الباب الثانى

الإضافات Admixtures

تتركب الخرسانة من الركام والأسمنت وماء الخلط وفى بعض الأحيان تستخدم بعض الإضافات الكيميائية بغرض تحسين بعض الصفات المعينة فى الخرسانة. وفي هذا الباب سنتناول ببعض التفصيل الإضافات الكيميائية من حيث أنواعها ووظائفها وخصائصها وكيفية الإستفادة منها.

٢-١ تعريف

الإضافات هى مواد - غير الركام والأسمنت والماء- تضاف إلى الخلطة الخرسانية أثناء عملية الخلط بكميات صغيرة جداً بغرض إعطاء الخرسانة الطازجة أو الخرسانة المتصلدة خواص معينة مطلوبة مثل:

- **تحسين القابلية للتشغيل للخرسانة الطازجة دون زيادة ماء الخلط.**
- **التعجيل أو التأخير فى الشك.**
- **تقليل معدل فقد الهبوط للخرسانة.**
- **تحسين القدرة على ضخ الخرسانة.**
- **الحد من حدوث الإنفصال الحبيبى.**

- **زيادة المقاومة المبكرة للخرسانة.**
- **الحصول على خرسانة عالية المقاومة.**
- **تحسين خواص الخرسانة المتصلدة مثل مقاومة البرى.**
- **الحصول على خرسانة غير منفذة للماء أو خرسانة خلوية أو خرسانة ذات صفات خاصة.**

٢-٢ الاشتراطات العامة المطلوبة عند إستخدام الإضافات

١- يجب أن لا تؤثر تأثيراً ضاراً على الخرسانة أو حديد التسليح.

٢- أن تتناسب الفوائد الناتجة من إستخدام الإضافات مع الزيادة فى التكاليف.

٣- يجب عدم إضافة كلوريد الكالسيوم أو الإضافات التى أساسها من الكلوريدات بتاتاً إلى الخرسانة المسلحة أو الخرسانة سابقة الإجهاد أو الخرسانة التى بها معادن مدفونة.

٤- يجب التأكد من مدى ملائمة وفاعلية أى من الإضافات بواسطة خلطات تجريبية.

٥- إذا إستخدم نوعين أو أكثر من الإضافات فى نفس الخلطة الخرسانية فيلزم أن تتواجد معلومات كافية لبيان مدى تداخلهما والتأكد من مدى توافقهما.

٦- يراعى أن سلوك الإضافات مع الأسمنتات المخلوطة أو عالية المقاومة للكبريتات يختلف عنه فى حالة الأسمنت البورتلاندى. لذلك يجب أن تتوافر معلومات كافية عن مدى الأدائية السليمة للإضافات مع الأنواع المختلفة من الأسمنت.

٧- يلزم توريد الإضافات معبأة داخل براميل أو أوعية محكمة الغلق ومطبوع عليها الإسم التجارى وتاريخ الإنتاج ومدة الصلاحية وكذلك شهادة بخواص الإضافة الموردة ومطابقتها للمواصفات القياسية ذات الصلة. كما يجب تخزين الإضافات بطريقة تحميها من الرطوبة ومن أشعة الشمس والحرارة.

٢-٣ أهم الأنواع الشائعة من الإضافات

يوجد العديد من الإضافات الكيميائية التى تستخدم مع الخرسانة ويمكن تقسيمها إلى المجموعات الآتية:

١- إضافات تخفيض الماء والتحكم فى الشك (سبعة أنواع).
٢- إضافات الهواء المحبوس.
٣- إضافات لمنع نفاذ الماء بالخرسانة.
٤- إضافات لمقاومة إجتراف الأسمنت بفعل الماء
٥- إضافات لتلوين الخرسانة.
٦- إضافات أخرى متنوعة.

٢-٣-١ إضافات تخفيض الماء والتحكم فى الشك

Water Reducing and Set Controlling Admixtures (ASTM C494)

وهذه الإضافات هى أهم وأكثر أنواع الإضافات إستخداماً وشيوعاً فى مجال الخرسانة وهى تختص بتقليل ماء الخلط (بدرجات متفاوته) والتحكم فى تصلب الخرسانة بالتأخير أو التعجيل. وتنقسم هذه المجموعة إلى سبعة أنواع مختلفة وتميزها المواصفات الأمريكية ASTM C494 بالحروف من A إلى G كما يلى:

١ـ إضافات تخفيض ماء خلط الخرسانة	ASTM C494 - Type A
٢ـ إضافات تأخير الشك	ASTM C494 - Type B
٣ـ إضافات تعجيل الشك	ASTM C494 - Type C
٤ـ إضافات تخفيض ماء الخلط وتأخير الشك	ASTM C494 - Type D
٥ـ إضافات تخفيض ماء الخلط وتعجيل الشك	ASTM C494 - Type E
٦ـ إضافات تخفيض ماء خلط الخرسانة بدرجة عالية	ASTM C494 - Type F
٧ـ إضافات تخفيض ماء خلط الخرسانة بدرجة عالية وتأخير الشك	ASTM C494 - Type G

وكما نرى فإن الأنواع السبعة السابقة بهذه المجموعة من الإضافات ينحصر تأثيرها فى واحد أو أكثر من التأثيرات الثلاث الرئيسية الآتية:

١ـ تخفيض ماء الخلط (الملدنات والملدنات الفائقة)	ASTM Type A, F
٢ـ تأخير الشك (المؤجلات)	ASTM Type B
٣ـ تعجيل الشك (المعجلات)	ASTM Type C

فنجد مثلاً أن النوع D عبارة عن مزيج من النوعين A , B.

أما النوع E عبارة عن مزيج من النوعين A , C.

فىحين نجد أن النوع G عبارة عن مزيج من النوعين B , F.

وفيما يلي شرح موجز للأنواع الرئيسية من هذه المجموعة

أولاً: مخفضات الماء (الملدنات والملدنات الفائقة) Plasticizers and Superplasticizers

ASTM C494 Type A & F

توجد الملدنات (البلاستسيزر) و الملدنات الفائقة (السوبربلاستسيزر) عموماً فى صورة سائلة وتضاف الى الخلطة الخرسانية بنسبة تتراوح من ١% إلى ٣% من وزن الأسمنت وهى أكثر وأهم أنواع الإضافات إستخداماً وشيوعاً. وقد وجد أن نسبة ٣% من الملدنات الفائقة تعطى أفضل النتائج. وتوجد الملدنات فى السوق تحت أسماء تجارية عديدة منها أدكريت - كونبلاست - سيكامنت - ملمينت ٠٠٠إلخ. والفرق بين النوعين A , F هو أن ان درجة تخفيض ماء الخلط بالنسبة للنوع A (الملدنات) تتراوح من ٦ إلى ١٢% عند ثبات قوام الخلطة الخرسانية. أما بالنسبة للنوع F (الملدنات الفائقة) فإن درجة تخفيضها للماء تزيد عن ١٢% وقد تصل إلى ٣٠% عند نفس قوام الخلطة الخرسانية.

❐ وظيفتها ❐

- تحسين خواص الخرسانة الطازجة وذلك بزيادة القابلية للتشغيل وزيادة السيولة مع ثبات نسبة (م/س) كما فى شكل (٢-١).
- الحصول على خرسانة ذاتية الدمك.
- تحسين خواص الخرسانة المتصلدة وذلك بتخفيض نسبة (م/س) فى الخلطة مع ثبات درجة القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على خرسانة عالية المقاومة (شكل ٢-٢).
- الحصول على خرسانة ذات مقاومة مبكرة عالية (شكل ٢-٣).
- الحصول على خرسانة عالية الأداء قليلة النفاذية.
- الحصول على خرسانة بدون إنفصال حبيبى أو نضح.

◻ طبيعة الملدنات ◻

الملدنات (A) والملدنات الفائقة (F) عبارةعن مواد بوليمرية تأخذ تركيبات كيميائية متنوعة من أهمها:

- الأساس الكيميائى للنوع A

- لجنوسلفونيت	Ligno-Sulfonate
- أحماض الهيدروإكسيكربوإكسلك	Hydroxycarboxylic Acids
- كربوهيدرات	Carbohydrates

- الأساس الكيميائى للنوع F

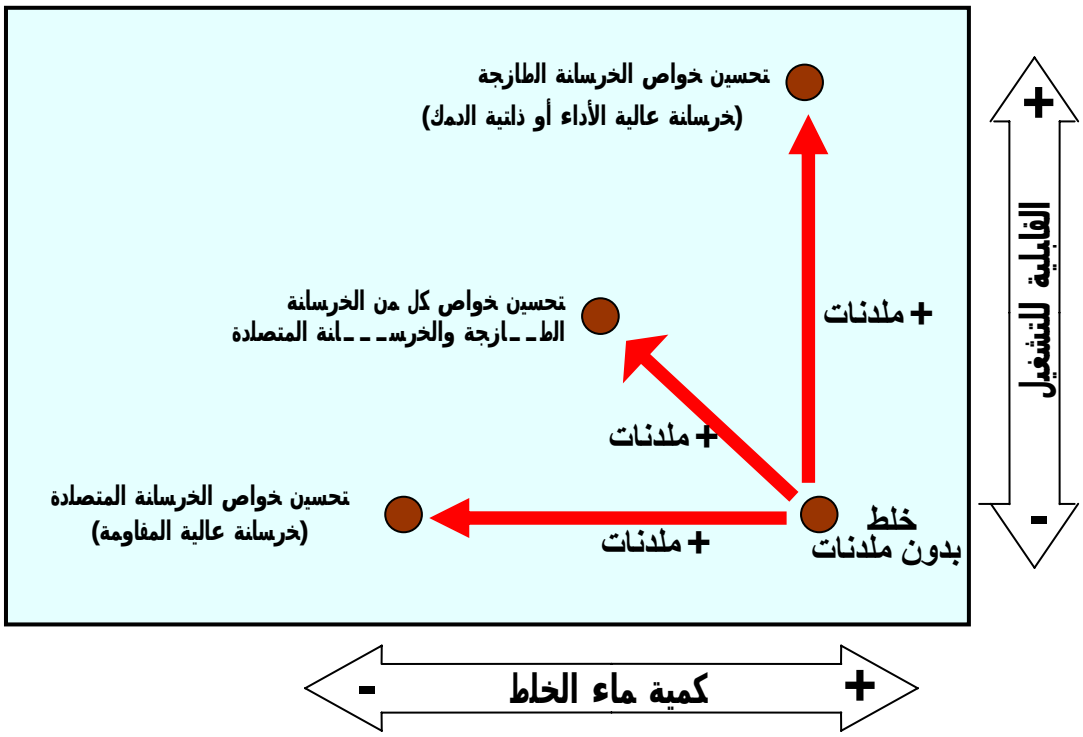
- لجنوسلفونيت معدل	Modified Ligno-Sulfonate
- ميلامين فورمالدهيد	Melamine Formaldehyde
- نفثالين فورمالدهيد	Naphthaline Formaldehyde
- فينول فورمالدهيد	Phenol Formaldehyde
- ناتج تكثيف بيتا نفثالين سلفونيت	Beta-naphthaline Sulfonate

ويمكن الحصول على النوع الأول (لجنوسلفونيت)كمنتج ثانوى من مصانع الورق. و تجدر الإشارة هنا إلى إمكانية مزج النفثالين والميلامين بكبريتات السليلوز التى تعتبر أقل تكلفة من النفثالين والميلامين بالإضافة أن كمية السكر الموجودة فى كبريتات السيليلوز فى معظم الحالات تكون مبطئة للشك مما يعنى إحتفاظ الخرسانة بتشغيليتها لفترة طويلة والتحكم بدرجة معينة فى معدل فقد الهبوط Control of Slump Loss وهو مناسب للإستخدام فى المناطق الحارة (Type D or G). وتجدر الإشارة أن تأثير الملدنات الفائقة على قوام الخرسانة لايستمر إلا لمدة من ٣٠ إلى ٦٠ دقيقة من لحظة إضافته إلى الخرسانة ، و تقل هذه المدة بإرتفاع درجة الحرارة حيث أن معدل فقد الهبوط فى الخرسانة المحتوية على الملدنات الفائقة يزداد بإزدياد درجة الحرارة.

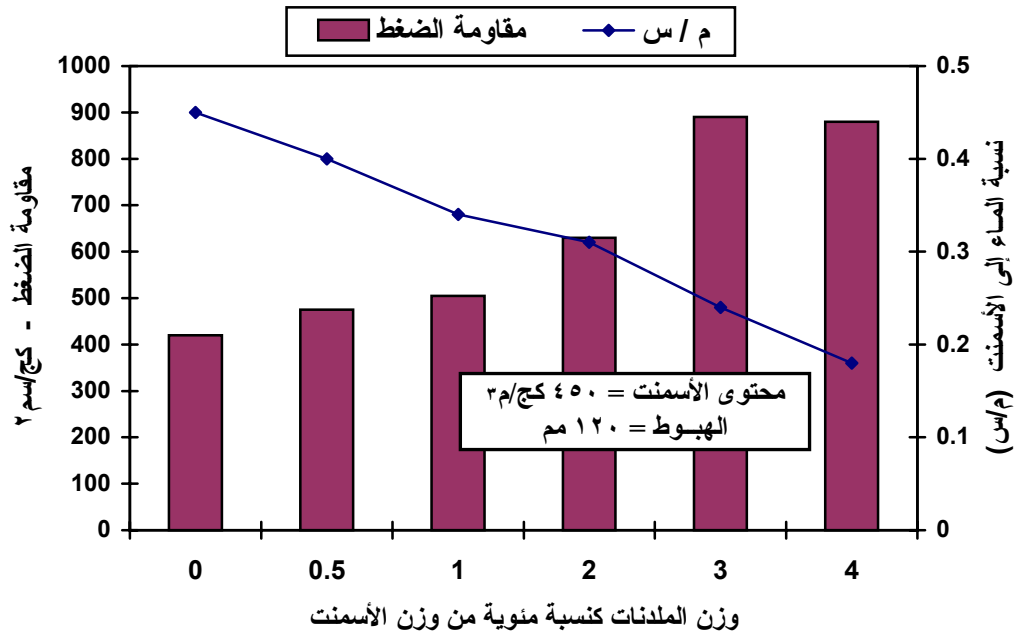
◻ أسـس إختيـار الملدنات والملدنات الفائقة ◻

ينبغي أن يكون إختيار نوع مادة الملدن على الأسس الآتية:

١- معدل تخفيض ماء الخلط
٢- معدل فقد القابلية للتشغيل
٣- التأثير على زمن الشك
٤- التوافق مع الأسمنت المستخدم
٥- المقاومة الناتجة للخرسانة
٦- الثمن و التكاليف.



شكل (٢-١) الوظائف الرئيسية للملدنات أو الملدنات الفائقة.



شكل (٢-٢) تأثير الملدنات الفائقة على كل من مقاومة الضغط ونسبة الماء إلى الأسمنت.

◻ كيف تعمل الملدنات ◻

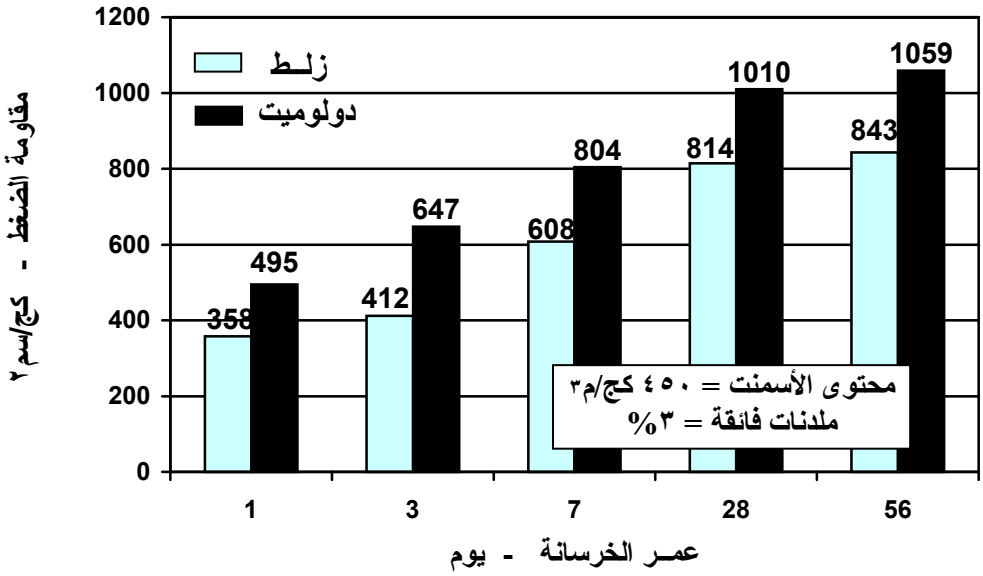
إن كيفية عمل الملدنات أو الملدنات الفائقة فى تسييل الخرسانة يأخذ واحداً أو أكثر من الصور الآتية:

١- تشتيت حبيبات الأسمنت المتكتلة وإطلاق المياه المحبوسة بينها.
٢- إحداث التنافر الكهروستاتيكى بين الجزيئات.
٣- العمل علىتشحيم الطبقة الرقيقة بين حبيبات الأسمنت.
٤- تأجيل عملية الإماهة السطحية لحبيبات الأسمنت مع ترك المزيد من المياه لتسييل الأسمنت.
٥- تقليل الشد السطحى للمياه.
٦- تغير البنية التركيبية فى منتجات تفاعلات الإماهة.

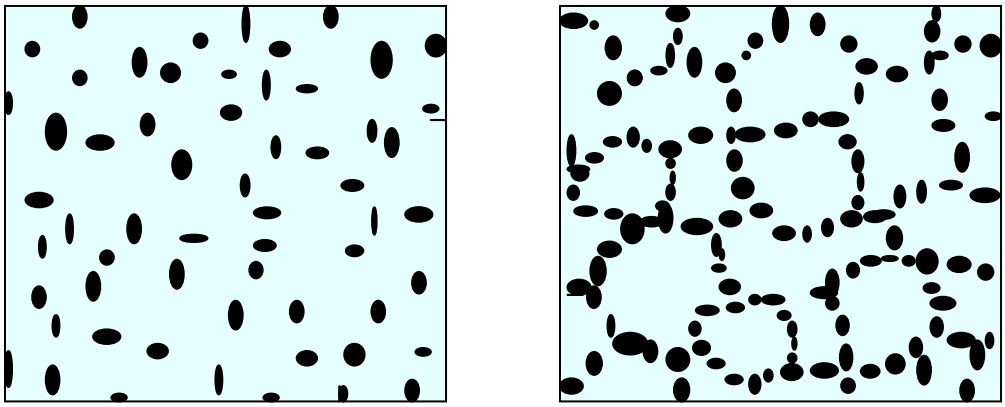
إن جزئيات الأسمنت البورتلاندى العادى تتميز بميلها الشديد للتكتل عندما تخلط مع الماء وهذا الميل هو حصيلة لتفاعلات داخلية متنوعه مثل التفاعلات الالكتروستاتيكية بين الشحنات المتضادة وكذلك تفاعلات عملية الإماهة المتنوعة. إن عملية التكتل تقود إلى تشكيل شبكة من الجزيئات كما هو موضح فى الشكل (٢-٤-أ) حيث تقوم هذه الشبكة بحجز نسبة من الماء حيث يكون هذا مطلوباً لإتمام عملية الإماهة وكذلك توفير التشغيلية المطلوبة فى الخرسانة. ويترتب على ذلك حدوث زيادة فى اللزوجة الظاهرية للنظام الأسمنتى. ودور الملدنات أو الملدنات الفائقة هنا هو العمل على فصل حبيبات الأسمنت المتكتلة عن بعضها ومن ثم الحصول على توزيع متجانس للمياه وإتصال مثالى بين المياه وحبيبات الأسمنت كما هو موضح بشكل (٢-٤-ب).

◻ إختبار عملى ◻

يمكن الوصول إلى طبيعة عمل الملدنات أو الملدنات الفائقة من حيث القيام بفصل حبيبات الأسمنت المتكتلة عن بعضها وذلك بإجراء تجربة ترسيب بسيطة حيث تُؤخذ كمية ثابته من الأسمنت وتُخلط مع الماء خلطاً جيداً ويُترك العالق فى مخبار مدرج وسنلاحظ أن جزيئات الأسمنت تكتلت وهبطت إلى القاع فى خلال وقت صغير نسبياً قد يصل إلى حوالى ٢٠ دقيقة فقط كما نلاحظ أن حجم هذه الحبيبات قد أصبح أكبر مما كان عليه ويتضح ذلك من الفارق فى الحجم المشغول فى المخبار المدرج بالأسمنت الجاف عند مقارنته بالأسمنت الرطب. بينما إذا إستخدمنا نوع معين من الملدنات أو الملدنات الفائقة مع نفس كمية الأسمنت السابقة يلاحظ أنه بعد مضى نفس الزمن السابق أن جزيئات الأسمنت ما تزال معلقة فى الماء ولا يتم ترسبها كلياً إلا بعد وقت يتراوح من ٢٤ساعة إلى ٤٨ساعة وفى هذه الحالة شكلت جزيئات الأسمنت طبقة كثيفة لها نفس حجم الأسمنت الجاف وهذه التجربة تشير بوضوح إلى أن الملدنات أو الملدنات الفائقة تكون فعالة جداً فى تفكيك جزيئات الأسمنت وتشتيتها ويمكن إستغلال هذه التجربة أيضا فى تحديد نسبة الإضافة المطلوبة للأسمنت.



شكل (٢-٣) استخدام الملدنات الفائقة للحصول على مقاومة مبكرة عالية.



(أ) بدون ملدنات (تكتل) (ب) وجود ملدنات (تشتت)

شكل (٢-٤) دور الملدنات أو الملدنات الفائقة فى فصل وتشتيت حبيبات الأسمنت المتكتلة.

ثانياً: إضافات تأخير الشك (المؤجلات) Retarders

ASTM C494 Type B

❐ وظيفتها ❐

تؤخر شك الأسمنت أى تزيد زمن شك و تصلد الخرسانة وتقلل درجة حرارة الإماهة للأسمنت فيقل معدل زيادة المقاومة Rate of Strength Gain وقد تسبب المؤجلات زيادة الإنكماش اللدن فى الخرسانة ولكن ليس لها تأثير يذكر على الخواص الطبيعية والميكانيكية للخرسانة المتصلدة.

❐ الهدف منها ❐

- عمل خرسانة فى الأجواء الحارة حيث يحدث الشك الإبتدائى للأسمنت سريعاً جداً.
- إذا كانت ظروف صب الخرسانة صعبة ويلزم جعل المونة الأسمنتية لدنة أو سائلة لمدة طويلة.
- إذا كانت هناك رسالة من الأسمنت ذات زمن شك صغير جداً.
- الحصول على خرسانة ذات ركام بارز ظاهر بسطحها.

❐ أهم المركبات المستخدمة ❐

المواد الكربوهيدراتية Carbohydrates والسكر Sugar

وأملاح الزنك Zink والفوسفات Phosphates.

ثالثاً: إضافات تعجيل الشك (المعجلات) Accelerators

ASTM C494 Type C

❐ وظيفتها ❐

تعجل أو تسرع من شك الأسمنت أى تقلل زمن شك و تصلد الخرسانة وبالتالى يزداد معدل التصلد وكذلك تزداد الحرارة المنبعثة المبكرة.

▫ الهدف منها ▫

أ- تستخدم بغرض التعجيل بالشك كما فى الأحوال الآتية:

- إزالة تأثير تأخر الشك الناتج من درجات الحرارة المنخفضة.
- إزالة تأثير تأخر الشك الناتج من إستخدام اضافة أخرى.
- أعمال الطوارئ مثل وقف رشح المياه فى الخزانات.

ب- تستخدم بغرض الحصول على خرسانة مبكرة المقاومة كما فى حالة:

- إزالة الفرم مبكراً.
- التعجيل بزمن إستخدام المنشأ الخرسانى.
- تقليل المدة المطلوبة للمعالجة.

جـ- تستخدم بغرض الحصول على خرسانة تقاوم الصقيع وذلك نتيجة الحرارة المنبعثة المبكرة.

▫ أهم المركبات المستخدمة ▫

المركبات المستخدمة كمعجلات للشك فى الخرسانة هى الهيدروكسيدات القلوية وأملاح الكربونات الذائبة والسليكات ونترات الكالسيوم وكلوريد الكالسيوم و هو الأكثر شهرة نظراً لرخص سعره و كفائته العالية فى رفع المقاومة المبكرة وتقليل زمن الشك وأملاح الكربونات الذائبة وتستخدم بنسب ١ إلى ٢% وبحد أقصى ٤% من وزن الأسمنت. ولكن من عيوب إستخدام كلوريد الكالسيوم فى الخرسانة االمسلحة هو إمكانية حدوث تآكل وصدأ فى حديد التسليح نتيجة تواجد أيونات الكلور فى وجود الرطوبة والأكسجين. لذلك يجب عدم إستخدام كلوريد الكالسيوم فى الخرسانة المحتوية على حديد تسليح. ويوجد مركبات أخرى بديلة ولكنها أقل كفاءة وأغلى ثمناً مثل نيتريت الكالسيوم وأملاح النترات والبروميدات والفلوريدات والكربونات والسليكات.

▫ إحتياطات ▫

- **عدم زيادة نسبة هذه الإضافات عن الحد الأقصى وذلك مخافة حدوث الشك الخاطف Flash Set.**
- **استخدامها فى الأجواء الحارة بحساب وحذر لتلافى حدوث شروخ الانكماش.**

٢-٣-٢ إضافات الهواء المحبوس Air Entraining Admixtures

❐ الهدف منها ❐

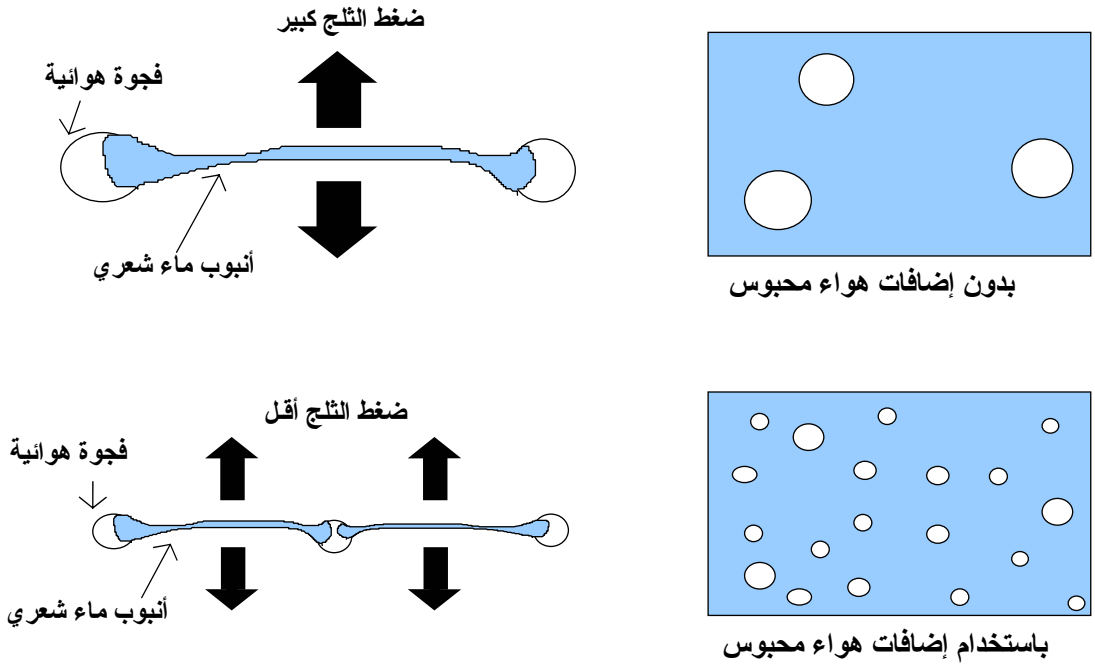
تقليل وزن الخرسانة وزيادة المتانة Durability وخاصة المقاومة للصقيع Frost Resistance ويتم ذلك عن طريق إحداث فقاعات Bubbles هوائية دقيقة (غير متصلة) موزعة توزيعاً منتظماً خلال الكتلة الخرسانية وتبقى كذلك بعد تصلد الخرسانة كما فى شكل (٢-٥).

❐ ويمكن أن يتم ذلك بطريقتين ❐

١- إضافة مواد تحدث رغاوى Foaming وذلك أثناء خلط الخرسانة مثل بعض المركبات العضوية كالأصماغ الخشبية Resins والزيوت والمنظفات الصناعية.

٢- إستخدام مواد صلبة تتفاعل مع الأسمنت وتنتج غاز الهيدروجين على هيئة فقاعات دقيقة كثيرة مثل مسحوق بودرة الألمنيوم وبودرة الزنك والماغنسيوم.

وتستخدم هذه المواد بنسب تتراوح من ٠,٠١% إلى ٠,٠٣% من وزن الأسمنت وتحدث هواء محبوس يتراوح من ٥% إلى ١٥% من حجم الخرسانة. ولا تؤثر هذه الإضافات على زمن الشك للخرسانة بينما تؤدى إلى زيادة إنكماش الجفاف وتقل المقاومة فقد وجد أن هناك علاقة عكسية بين نسبة الهواء المحبوس فى الخلطة ومقاومة الضغط للخرسانة ، حيث تقل المقاومة بمعدل حوالى ٥% تقريباً لكل نسبة هواء محبوس مقدارها ١%.



شكل (٢-٥) تأثير إضافات الهواء المحبوس فى تحسين مقاومة الصقيع.

٢-٣-٣ إضافات لمنع نفاذ الماء بالخرسانة Permeability-Reducing Admixtures

❐ الهدف منها ❐

تساعد على مقاومة نفاذ الماء إلى الخرسانة ولكنها لا تمنع نفاذ الماء تماماً. وللوصول إلى درجة عالية من مقاومة النفاذية ينبغى العناية بتصميم الخلطة الخرسانية ثم العناية بعمليتى الدمك والمعالجة.

❐ ويمكن تحسين منفذية الخرسانة من خلال المحاور الثلاثة الآتية ❐

١- إضافات صادة للماء Water Proofing Agents

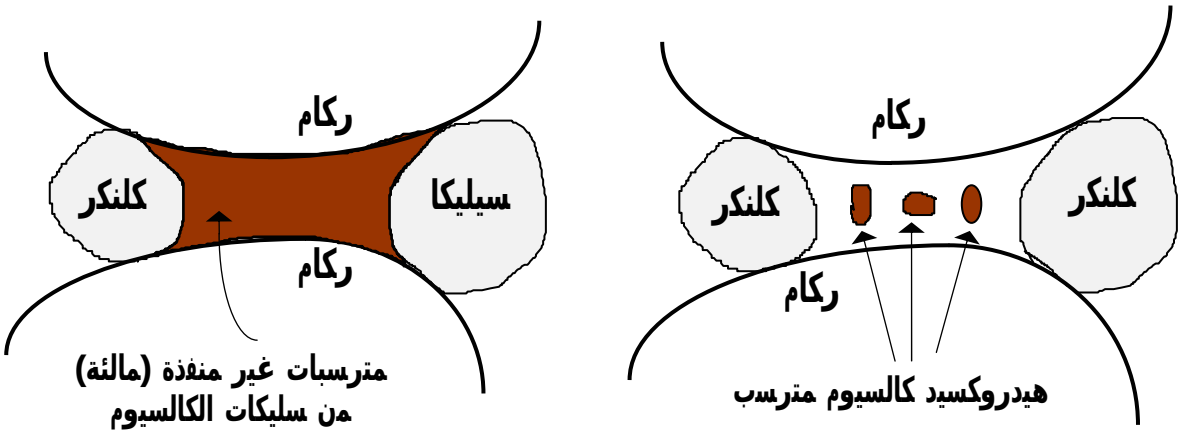
وهى تعمل على منع الخرسانة من امتصاص ماء المطر والمياه السطحية الملامسة ومن امثلتها زيوت البترول والشمع Wax وتضاف بنسبة تتراوح من ٠,١% إلى ٠,٤% من وزن الأسمنت. وتستخدم المواد البوليمرية أيضاً لهذا الغرض وذلك فى صورة دهانات لأسطح الخرسانة لسد الفجوات الهوائية والشروخ الشعرية الموجودة بالسطح.

٢- استعمال الملدنات الفائقة Superplasticizers

وهى تفيد هنا بطريقة غير مباشرة حيث أنها تعمل على تقليل ماء الخلط وبالتالى الحصول على أقل نسبة فراغات ممكنة بالخلطة ومن ثم تتحسن منفذية الخرسانة.

٣- إستعمال مواد بوزولانية مالئة للفراغات Pozzolanic Materials (Filling Effect)

والمواد البوزولانية هى المواد التى تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج من تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات وألومنيات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية ومن أمثلتها مادة غبار السيليكا Silica Fume وهى مادة تتكون من حبيبات دقيقة جداً مساحتها السطحية حوالى أربعة إلى خمسة أمثال المساحة السطحية للأسمنت (٢٠٠٠٠ سم^{٢}/جم) وهى ناتج ثانوى Byproduct فى صناعة سبائك السيليكون والفيروسليكون. وتتفاعل مادة غبار السيليكا مع هيدروكسيد الكالسيوم مكونة سيليكات الكالسيوم المماهة والتى لاتذوب فتؤدى إلى تقليل الفجوات الداخلية والمسام الشعرية كما هو موضح فى شكل (٢-٦).



عملية الإماهة للخرسانة المحتوية على غبار السيليكا

عملية الإماهة للخرسانة المحتوية على أسمنت بورتلاندى

شكل (٢-٦) دور غبار السليكا فى تحسين منفذية الخرسانة.

٢-٣-٤ إضافات لمنع إجتراف الأسمنت بفعل الماء Antiwashout Admixtures

عند صب الخرسانة تحت الماء يعمل الماء على إجتراف الأسمنت من الخرسانة وينتج عن ذلك نقص فى مقاومتها و تعكر فى المياه المحيطة بها. ولهذا السبب يستخدم هذا النوع من الإضافات التى تعتبر من أحدث أنواع الإضافات الموجودة فى السوق حالياً. و تعمل هذه الإضافات على تكوين جل فى الماء المحيط بحبيبات الأسمنت فتحميه من الإجتراف بفعل الماء كما تعمل على زيادة اللزوجة و التماسك بين جزئيات الخرسانة و تحسن من مقاومتها للإنفصال. ويستخدم هذا النوع من الإضافات أيضاً فى إنتاج الخرسانة عالية السيولة أو الخرسانة ذاتية الدمك حيث تقوم هذه الإضافات بمقاومة الإنفصال الحبيبى وزيادة التماسك للخرسانة. وتتكون هذه الإضافات من بوليمرات أكريليكية أو مركبات سليولوزية على هيئة بودرة قابلة للذوبان فى الماء وتضاف إلى الخلطة بنسبة تقريبية ١% من وزن الأسمنت.

ولتقييم كفاءة هذه الإضافات لمقاومة الخرسانة لإجتراف الأسمنت بفعل الماء يتم إجراء إختبار سقوط الخرسانة فى الماء حيث يتم وضع كمية من الخرسانة حجمها ٣ لتر فى سلة مثقبة ثم يسمح بسقوطها ورفعها خمس مرات خلال الماء الموجود فى وعاء قطره ٣٠ سم وإرتفاعه ٥٠ سم. يتم قياس النقص فى وزن الخرسانة نتيجة إجتراف الأسمنت و تقاس درجة العكارة للماء حيث ينبغى أن لا تزيد عن ٥٠ مجم/لتر كما يقاس الأس الهيدروجينى pH للماء والذى يجب أن يقل عن ١٢,٥. كذلك تقاس مقاومة الضغط للخرسانة بعد إخراجها من الماء ، حيث يلزم أن تكون النسبة بين مقاومة الضغط للخرسانة المصبوبة تحت الماء و مقاومة الضغط للخرسانة المماثلة المصبوبة فى الهواء أكبر من ٨٠%.

ويمكن تلخيص تأثير هذا النوع من الإضافات فيما يلى:

١- تتحسن قدرة الخرسانة على مقاومة إنفصال مكوناتها.

٢- تتحسن مقاومة الخرسانة للنزيف بدرجة كبيرة.

٣- الخرسانة المحتوية على هذه الإضافات يكون لها القدرة على الإنسياب والتسوية الذاتية.

٤- النوع السليولوزى من هذه الإضافات يعمل على تأخير الشك الإبتدائى والنهائى ، حيث قد يصل الشك الإبتدائى إلى أكثر من ١٨ ساعة بينما يزيد الشك النهائى إلى ما يقرب من ٤٨ ساعة.

٥- تؤدى هذه الإضافات إلى نقص مقاومة الضغط للخرسانة المصبوبة تحت الماء بنسبة قد تصل إلى ٢٠% إذا ما قورنت بمقاومة الضغط للخرسانة المماثلة و المصبوبة فى الهواء.

٢-٣-٥ إضافات لتلوين الخرسانة Coloring Admixtures

وهى عبارة عن أكاسيد معدنية Metallic Oxide وهى متوفرة فى صورة مواد طبيعية أو صناعية ويشترط فيها أن تكون خاملة كيميائياً وأن لا تزيد نسبتها عن ١٠% من وزن الخرسانة. ومن أهم المواد المستخدمة فى ذلك:

أكسيد الحديد الأسود و الكربون	⇦	اللون الرصاصى أو الأسود
ثانى أكسيد التيتانيوم	⇦	اللون الأبيض
أكسيد الكروم	⇦	اللون الأخضر
أكسيد الحديد الأحمر	⇦	اللون الأحمر
أكسيد الحديد الأصفر	⇦	لون الكريم أو لون سن الفيل
أكسيد الحديد البني	⇦	اللون البنى

٢-٣-٦ إضافات أخرى متنوعة Miscellaneous Admixtures

يوجد العديد من الإضافات الأخرى التى تستخدم مع الخرسانة نذكر منها الآتى:

١- إضافات حقن الخرسانة.

٢- إضافات للمساعدة فى ضخ الخرسانة.

٣- إضافات لمنع تكون الرطوبة بالخرسانة.

٤- إضافات لمنع تكون الفطريات والبكتريا على الأسطح الخرسانية للمنشآت المآئية.

٥- إضافات لمنع التآكل والصدأ فى حديد التسليح.

٦- إضافات لتقليل التفاعل القلوى بين الركام والأسمنت.

٧- إضافات لتكوين الغازات داخل الخرسانة.

٨- إضافات لتحسين التماسك بين حديد التسليح والخرسانة.

****

الباب الثالث

الأنواع المختلفة (الخاصة) من الخرسانة

Special Types of Concrete

يوجد العديد من أنواع الخرسـانة ويمكن تصنيف أهم هذه الخرسانات كما يلي:

Plain Concrete	١- الخرسانة العادية
Reinforced Concrete	٢- الخرسانة المسلحة
Prestressed Concrete	٣- الخرسانة سابقة الإجهاد
Precast Concrete	٤- الخرسانة الجاهزة (سابقة الصب)
High Strength Concrete	٥- الخرسانة عالية المقاومة
Fibrous Concrete	٦- الخرسانة الليفية
Self-Compacting Concrete	٧- الخرسانة ذاتية الدمك
Polymer Concrete	٨- الخرسانة البوليمرية
Shotcrete	٩- الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش)
Light-Weight Concrete	١٠- الخرسانة الخفيفة
Heavy-Weight Concrete	١١- الخرسانة الثقيلة
Mass Concrete	١٢- الخرسانة الكتلية
Prepacked Concrete	١٣- الخرسانة المعبأة
Gap Concrete	١٤- خرسانة الركام ناقص التدرج
Architectural Concrete	١٥- الخرسانة المعمارية
Nailing Concrete	١٦- خرسانة التسمير
Sulfur Concrete	١٧- الخرسانة الكبريتية

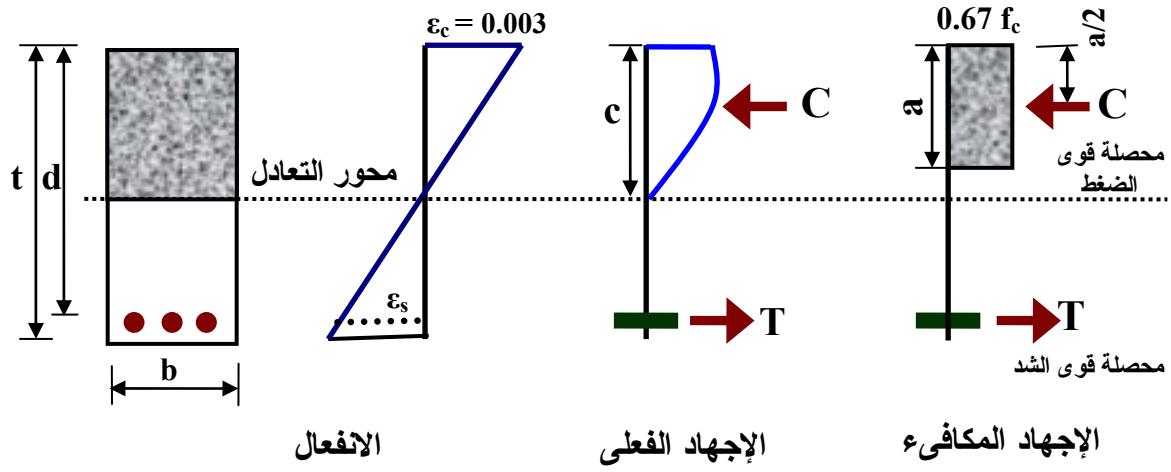
فيما يلي نبذة مختصرة عن أهم هذه الأنواع:

٣-١ الخرسانة العادية Plain Concrete

وهى خرسانة بدون أي حديد تسليح وتستخدم فى أعمال الفرشات الخرسانية تحت الأساسات والأرصفة وعمل الكتل الخرسانية الغير معرضة لإجهادات شد وعمل الأرضيات والسدود. ومقاومتها تتراوح من ١٥٠ إلى ٢٥٠ كج/سم^{٢} حسب الغرض المستخدمة من أجله. ويمكن تحسين بعض الخواص فيها لكي تناسب غرض الاستخدام ، مثلاً أن تكون مقاومة للكبريتات أو مقاومة لعوامل التعرية والتآكل كما فى حالة المصدات البحرية.

٣-٢ الخرسانة المسلحة Reinforced Concrete

وهى خرسانة عادية ويشترك معها حديد تسليح لمقاومة إجهادات الشد وهذا النوع من الخرسانة هو الأكثر شيوعاً واستخداماً فى العالم وذلك لسهولة تنفيذه ورخص تصنيعه. ويمكن أن يُصب فى الموقع مباشرة أو يُصب فى المصنع لعمل وحدات خرسانية جاهزة. وينبغي تحقيق الاتزان Equilibrium و التوافق Compatibility بين الإجهادات و الانفعالات فى كل من الخرسانة و الحديد. ومعظم كودات التصميم تهمل تماماً مقاومة الخرسانة للشد وبالتالى فإن الحديد يتحمل كل قوى الشد المؤثرة ، أما الخرسانة فتتحمل قوى الضغط. شكل (٣-١) يوضح توزيع الإجهادات والانفعالات على قطاع مستطيل من الخرسانة المسلحة.



شكل (٣-١) الإجهاد والإنفعال لعنصر من الخرسانة المسلحة ذو قطاع مستطيل معرض لعزم إنحناء .

٣-٣ الخرسانة سابقة الإجهاد Prestressed Concrete

وهى خرسانة عادية يتم إكسابها إجهادات ضغط قبل تحميلها وهذه الإجهادات تكون كفيلة بملاشاة إجهادات الشد الناتجة من تأثير الأحمال وبالتالى لا نحتاج إلى حديد تسليح حيث تكون المحصلة النهائية للإجهادات على طول القطاع الخرسانى بعد التحميل (التشغيل) هى غالباً إجهادات ضغط وبالتالى تكون الخرسانة كفيلة بتحملها. وبناءاً عليه يجب أن تكون الخرسانة ذات مقاومة عالية للضغط تتراوح من ٣٥٠ إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢} وذلك حتى يمكنها تحمل إجهادات ضغط التصنيع وإجهادات ضغط التشغيل. وأسياخ الصلب المستخدمة فى الخرسانة سابقة الإجهاد تسمى كابلات Tendons وهى عبارة عن أسلاك Wires أو حبال مجدولة من مجموعة أسلاك Strands أو قضبان من الصلب Bars. وتمتاز الخرسانة سابقة الإجهاد بقلة الشروخ السطحية مع مقاومة عالية للأحمال. وهى مناسبة للاستخدام فى الكبارى والمستودعات المائية والوحدات الجاهزة مثل فلنكات السكك الحديدية وأعمدة التلغراف. وعموماً يوجد طريقتان لإكساب الخرسانة لإجهادات الضغط:

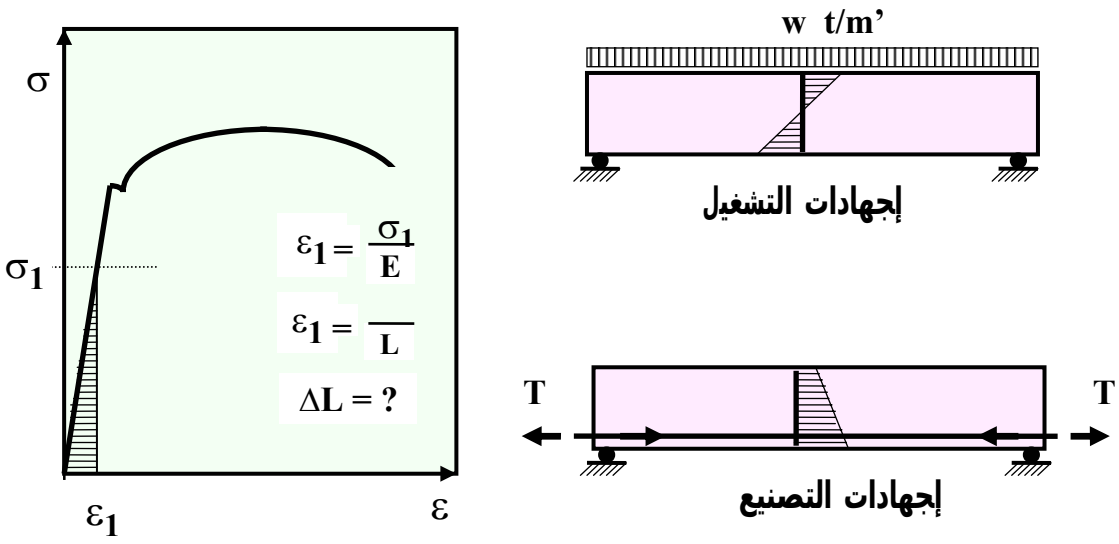
أ- طريقة الشد السابق Pre-tension

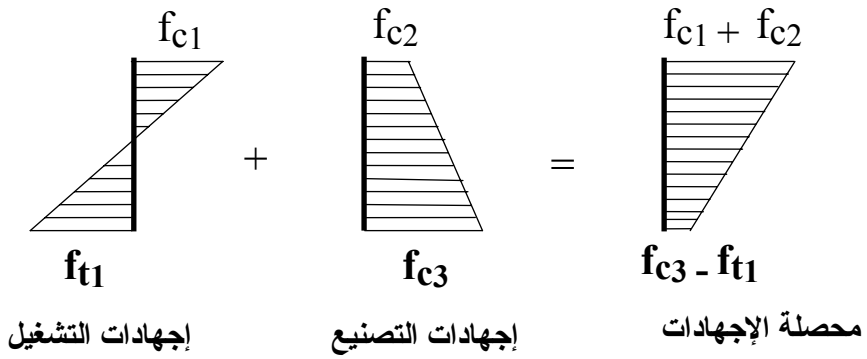
وفيها يتم شد كابلات الصلب قبل صب الخرسانة وقبل تصلدها. وتترك هذه الكابلات مشدودة (فى حدود المرونة) حتى تتصلد الخرسانة وتكتسب مقاومتها القصوى ثم بعد ذلك يتم رفع وإزالة قوى الشد من الصلب الذى يحاول أن ينكمش داخل الخرسانة المتصلدة مما يؤدى إلى حدوث إجهادات ضغط فى الخرسانة عن طريق قوى التماسك بين الحديد و الخرسانة كما بشكل (٣-٢). وتستخدم طريقة الشد السابق فى إنتاج الوحدات سابقة الصب سابقة الإجهاد حيث تسمح المعالجة بالبخار واستخدام خرسانة عالية المقاومة المبكرة فى الإزالة المبكرة لتلك الوحدات والاستغلال اليومي للقوالب.

ب- طريقة الشد اللاحق Post-tension

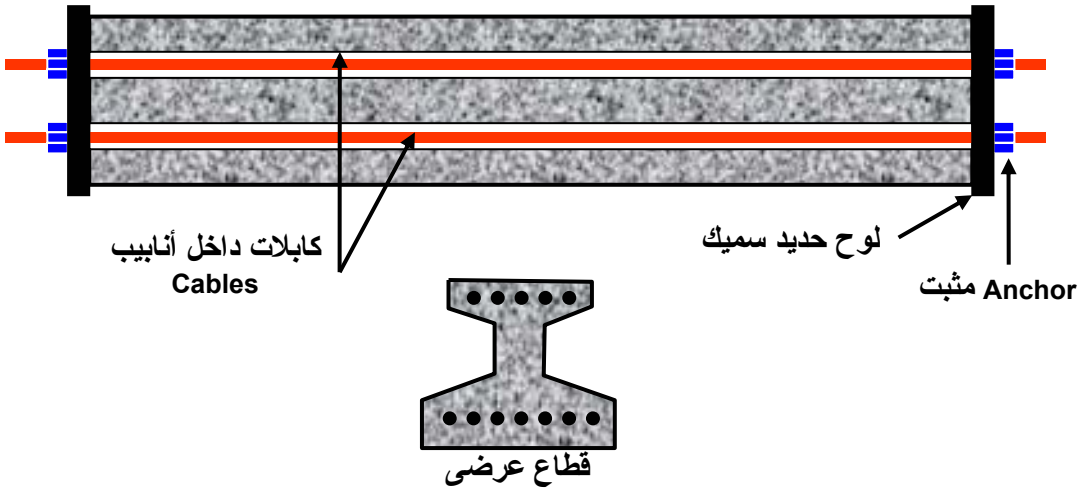
وفيها يتم عمل أنابيب مفرغة (مواسير أو أجربة) داخل الخرسانة وتوضع كابلات الصلب حرة الحركة بداخلها بدون شد حتى تتصلد الخرسانة تماماً (شكل ٣-٣). يتم شد الكابلات بعد تصلد الخرسانة حيث لا يكون هناك أى قوى تماسك بين الصلب و الخرسانة. بعد ذلك يتم رفع وإزالة قوى الشد من الصلب حيث يسبب إجهادات ضغط على ألواح الصلب المثبتة فى طرفى العنصر الخرسانى والتى تنتقل بدورها إلى الخرسانة بالتحميل. بعد ذلك تملأ الفراغات بين كابلات الصلب والمواسير بمونة الجراوت التى تتصلد وتقلل من فرصة صدأ صلب الكابلات.

هذا وفى الكود المصري لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة ـ طبعة ٢٠٠١ـ فقد تم تخصيص الباب العاشر للخرسانة سابقة الإجهاد حيث التعرف على كافة الاعتبارات الخاصة بالمواد المستخدمة فى هذه الخرسانة وتصميم قطاعاتها ونظم التحليل الإنشائى لها و التفتيش وضبط الجودة الخاص بهذه الخرسانة.





شكل (٣-٢) توضيح لطريقة الشد السابق.



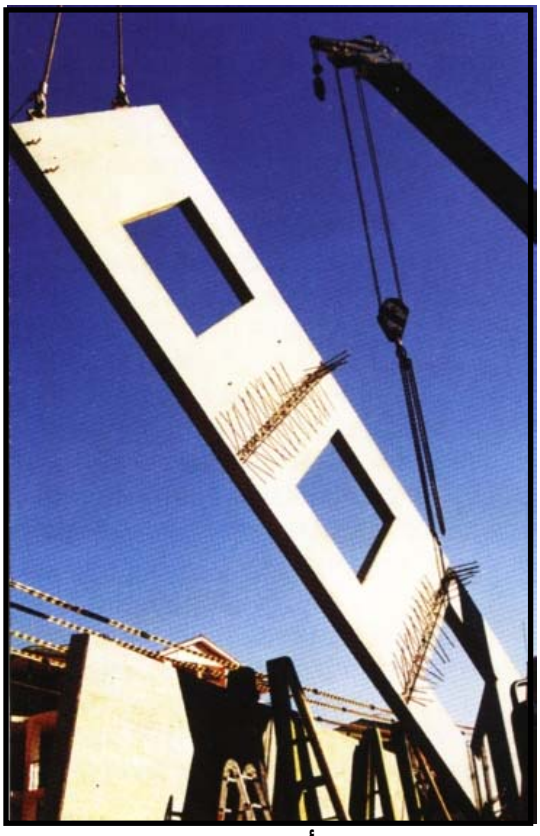
شكل (٣-٣) توضيح لطريقة الشد اللاحق.

٣-٤ الخرسانة الجاهزة (سابقة الصب) Precast Concrete

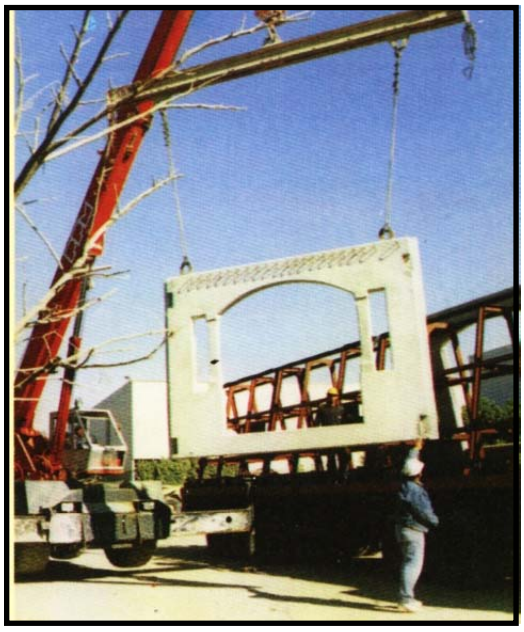
تصب الخرسانة وتعالج حتى تمام تصلدها فى المصنع ثم بعد ذلك تنقل إلى المنشأ وممكن أن تكون خرسانة عادية أو مسلحة أو سابقة الإجهاد وتشمل البلاطات والأعمدة والحوائط والبلوكات الخرسانية والفلنكات ووحدات الأسوار والسلالم. وفيها يتم التحكم فى عملية جودة الخرسانة والتصنيع مثل:

١- استخدام ركام جيد متدرج
٢- تقليل الماء
٣- إجراء الدمك والخلط ميكانيكا
٤- معالجة بالبخار
٥- استخدام إضافات للتلوين
٦- استخدام المواد العازلة المطلوبة

وتوضح الأشكال (٣-٤) ، (٣-٥) بعض التطبيقات التى تستخدم فيها الخرسانة سابقة الصب بنجاح. وعند تصنيع العناصر المختلفة من الخرسانة الجاهزة فيجب الأخذ فى الاعتبار كافة الأحمال الخارجية المؤثرة على العنصر فى مراحل التصنيع والتخزين والنقل و التركيب والتنفيذ والاستخدام.



حائط خرساني ثلاثة أدوار بارتفاع ٩,٨ متر.



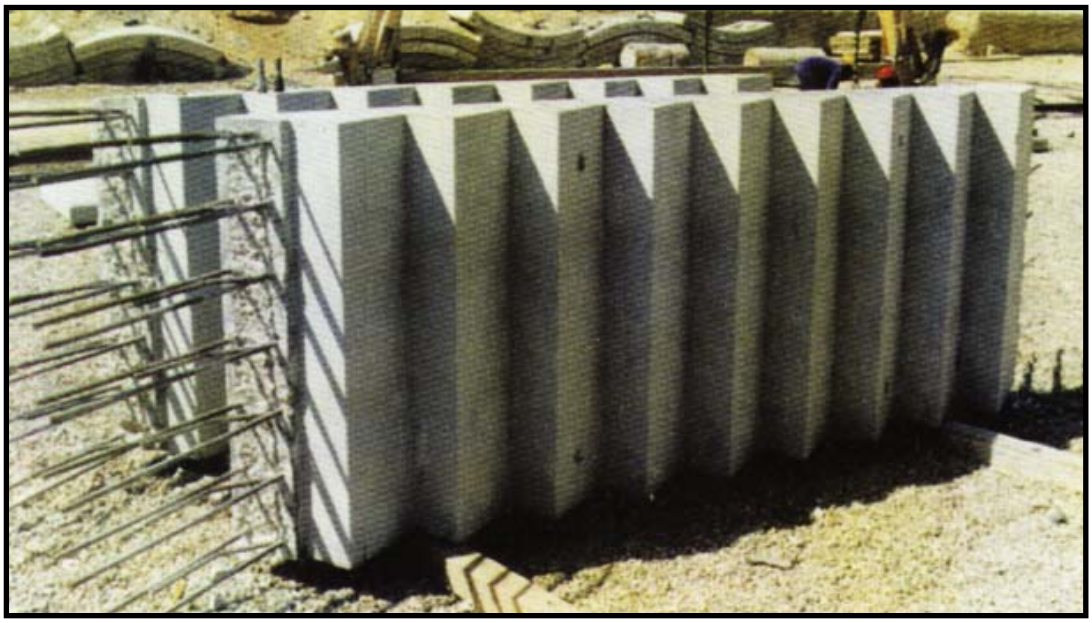
حائط خرساني ذو شكل معماري مميز.

شكل (٣-٤) بعض الحوائط من الخرسانة سابقة الصب .

سور من الخرسانة سابقة الصب بمدينة السادس من أكتوبر

مجارى خرسانية لتصريف مياه الأمطار
(نفق الأزهر)

حلقات خرسانية ذات تجويف بقطر ٨,٣٥ متر
(مترو أنفاق القاهرة)



سلالم خرسانية سابقة الصب (فندق الميريديان)

شكل (٣-٥) بعض التطبيقات المختلفة للخرسانة سابقة الصب .

٣-٥ الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete

وهى خرسانة ذات مقاومة تزيد عن ٦٠٠كج/سم^{٢} وقد تصل أو تزيد عن ١٤٠٠كج/سم^{٢} ويمكن الحصول عليها باستخدام المواد المحلية المتاحة والتى تستخدم فى صناعة الخرسانة التقليدية (٢٥٠كج/سم^{٢}) من ركام وأسمنت وماء إلا أن الخرسانة عالية المقاومة تحتوى على مادة إضافية أخرى وهى الملدنات Superplasticizers وذلك حتى يمكننا تقليل ماء الخلط إلى أقصى درجة مع الحصول على نفس القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على المقاومة العالية (أنظر البابين الأول والثانى). أما المواد البوزولانية مثل مادة غبار السيليكا Silica fume فقد توجد أولا توجد فى كلٍ من نوعىّ الخرسانة. إن أهم شىء يجب أخذه فى الاعتبار عند إنتاج خرسانة عالية المقاومة هو اختيار مجموعة المواد التى تتجانس مع بعضها لتعطى خرسانة جيدة لها المقاومة و المتانة وكذلك القابلية للتشغيل المطلوبة.

٣-٥-١ الخصائص المطلوب توافرها فى المكونات:

أ- الركام الكبير يجب أن يكون قوى ومتين لأنه يعمل كعامل يحدد مقاومة الخرسانة القصوى حيث أن الشروخ فى حالة الخرسانة عالية المقاومة تمر خلال حبيبات الركام الكبيرة وليس حولها كما فى حالة الخرسانة التقليدية. وقد وجد أن الخرسانة المصنوعة من الصخر (مثل الجرانيت أو الدولوميت) تعطى مقاومة أكبر بحوالى ١٠ إلى ٢٠% من تلك المصنوعة من الزلط.

ب- الركام الصغير أو الرمل يجب أن يكون خشن نوعاً ما حيث يكون معاير النعومة له من ٢,٨ إلى ٣,٠ وذلك لأن الخلطة تكون غنية بالمواد الناعمة مثل الأسمنت وغبار السيليكا إن وجدت.

ج- الأسمنت يجب أن يكون عالي الجودة وأن يكون متوافق مع أي إضافات مستخدمة. ولقد وجد أن النسبة المثلى التى تعطى أكبر مقاومة للخرسانة تقع بين ٤٥٠ إلى ٥٠٠كج/م^{٣} (٩ : ١٠ شكاير). ويعتمد ذلك على خصائص وكميات ونسب باقي المكونات وعما إذا كانت الخلطة تحتوى على مادة غبار السيليكا أم لا.

د- غبار السيليكا Silica fume وهى مادة بوزولانية تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج من تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية وبالتالى زيادة المقاومة وتحسين النفاذية. وعموماً فإن الزيادة فى مقاومة الضغط بتأثير مادة غبار السيليكا قد لا تتجاوز ٢٠%. وتجدر الإشارة أن النسبة المثلى من غبار السيليكا تتراوح من ١٠ إلى ١٥% من وزن الأسمنت.

هـ- الملدنات Superplasticizers وهى أهم مكون للحصول على خرسانة عالية المقاومة حيث بواسطتها نستطيع خفض نسبة ماء الخلط إلى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت فقط وبالتالى يمكننا الحصول على أعلى مقاومة. ويجب عمل تحقيق وتأكد من مدى توافق هذه المادة مع الأسمنت المستخدم.

٣-٥-٢ تطبيقات الخرسانة عالية المقاومة

ظل استخدام الخرسانة عالية المقاومة فترة طويلة محصوراً فى عدة تطبيقـــــــات تقليـدية Classical Applications هدفها الأوحد هو استغلال قيمة المقاومة العالية فى الحصول على أقل مساحة قطاع وأقل حجم للمنشأ وكذلك أقل وزن للمنشأ. ولذلك كانت هذه التطبيقات محددة فى ثلاثة أشياء رئيسية هى:

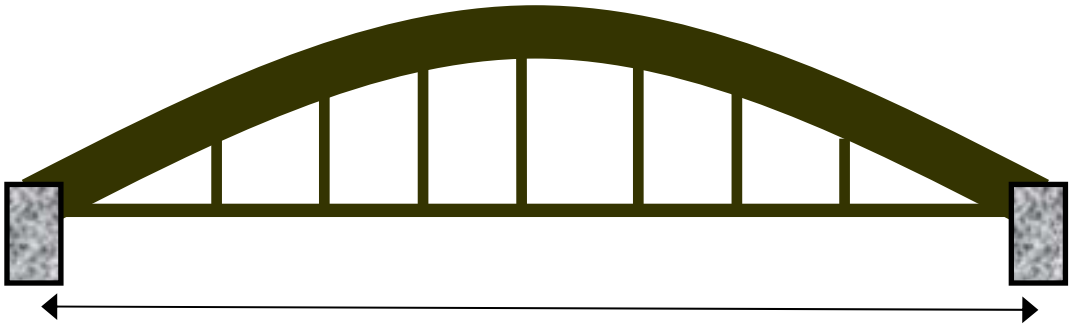
* المباني عالية الارتفاع High Rise Buildings
* الكبارى Bridges
* المنشآت البحرية Offshore Structures

وحديثاً تم استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تطبيقات أخرى متنوعة (شكل ٣-٦) للاستفادة بطريقة مباشرة أو غير مباشرة من مميزاتها العديدة. وهذه التطبيقات قد تأخذ اسم "تطبيقات غير تقليدية" Non-Classical Applications ومن هذه التطبيقات:

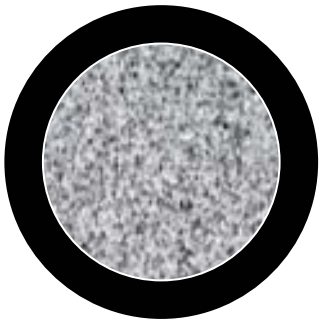
* الحصول على مقاومة مبكرة عالية High Early Strength
* إعادة إحياء العناصر الإنشائية القديمة مثل الأرش Arch Girder
* استخدامها مع قطاعات الحديد لزيادة جساءة المنشأ Improving Stiffness
* عمل خوازيق لولبية لتنفيذها بدون إهتزازت أو ضوضاء Screwing Piles
* محطات الطاقة النووية Nuclear Power Plants
* الأنابيب الخرسانية تحت الأرض Underground Concrete Pipes
* الأرصفة والطرق Pavements

ملحوظة :

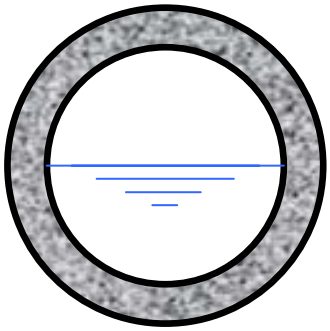
ينبغي أن نفرق بين الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete فالخرسانة عالية الأداء هى الخرسانة التى لها صفات وخصائص معينة تسمح لها بالعمل فى وسط محدد وفى ظروف معينة. والخصائص التى تميز الخرسانة عالية الأداء عن الخرسانات الأخرى قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة الطازجة مثل القابلية للتشغيل أو القوام أو قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة المتصلدة مثل مقاومة البرى والخدش أو المقاومة للصقيع أو المقاومة للانكماش. وهذه الخصائص قد تكون منفصلة أو مجتمعة بحيث تعطى خرسانة لها أداء مختلف عن أداء الخرسانة التقليدية المعتادة. والخرسانة عالية الأداء لا يشترط فيها أن تكون عالية المقاومة.



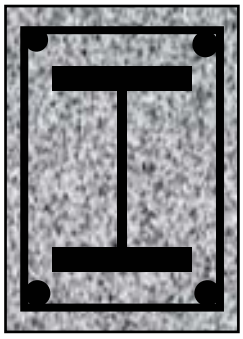
أرش Arch Girder



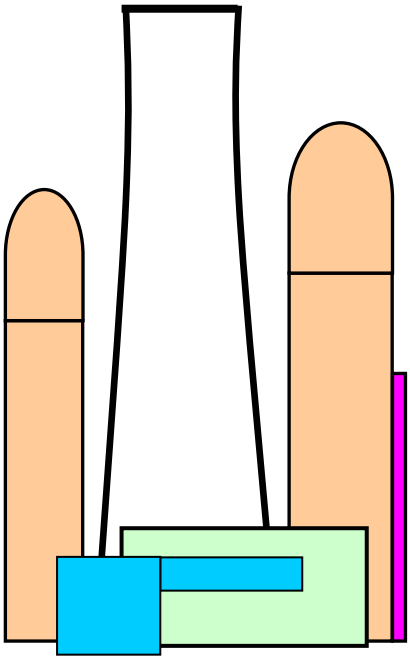
الأنابيب المعدنية المملوءة بالخرسانة



أنابيب المياه تحت الأرض



القطاعات المركبة



محطات الطاقة النووية

شكل (٣-٦) بعضاً من التطبيقات غير التقليدية للخرسانة عالية المقاومة.

٣-٥-٣ الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى مصر

إن الخرسانة عالية المقاومة تحتاج إلى تكلفة أكثر نتيجة استخدام مواد ذات جودة عالية وكذلك ثمناً للإضافات المستخدمة وأيضاً لضبط الجودة العالي. وبالرغم من ذلك فقد ثبت عملياً أن استخدام الخرسانة عالية المقاومة يكون له عائد إقتصادى أو عائد فنى كبير بالمقارنة بالخرسانات التقليدية الأخرى. ولقد تم دراسة هذه النقطة فى عدة أبحاث تختص بدراسة الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الأعمدة والكمرات وذلك تحت الظروف والأسعار الموجودة فى مصر. ومن الأبحاث التى تناولت هذه النقطة بالتحليل الأبحاث رقم ٢٧ ، ٢٨ ، ٢٩ بقائمة المراجع. وفيما يلي عرض موجز لأهم النتائج فى هذا الصدد.

أولاً العناصر المعرضة لقوى ضغط مثل الأعمدة

إن الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى العناصر المعرضة لقوى ضغط مثل الأعمدة تكون أقصى ما يمكن حيث يمكن الاستفادة من ذلك اقتصاديا (بتوفير التكاليف) وفنياً (بعمل تخفيض فى المساحات والمقاطع) ويمكن تلخيص ذلك فى النقاط الآتية:

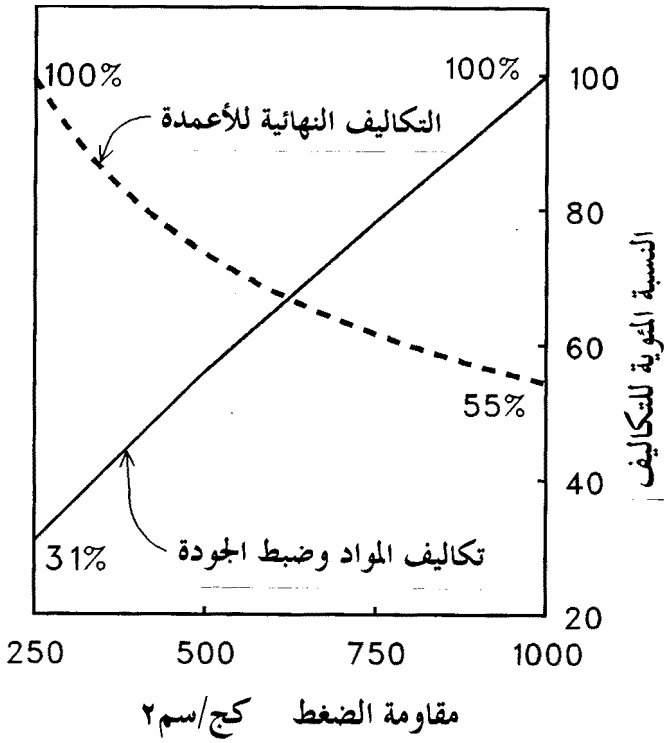
١- **على الرغم من زيادة تكاليف المتر المكعب من الخرسانة عالية المقاومة وكذلك زيادة تكاليف ضبط الجودة إلا أن التكاليف النهائية للعمود تقل كثيراً. فباستخدام خرسانة مقاومتها للضغط ١٠٠٠ كج/سم^{٢} فإن التكاليف النهائية للأعمدة تصل إلى حوالى ٥٥% فقط من التكاليف فى حالة استخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط ٢٥٠ كج/سم^{٢} كما هو مبين بشكل (٣-٧).**

٢- **مساحة القطاع الخرسانى للأعمدة المعرضة إلى حمل ضغط محوري تقل إلى ما يقرب من ٥٤% و ٣٧% نتيجة استخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط تساوى ٥٠٠ كج/سم^{٢} و ٧٥٠ كج/سم٢ بدلاً من ٢٥٠ كج/سم^{٢} على الترتيب (أنظر شكل ٣-٨ ، شكل ٣-٩).**

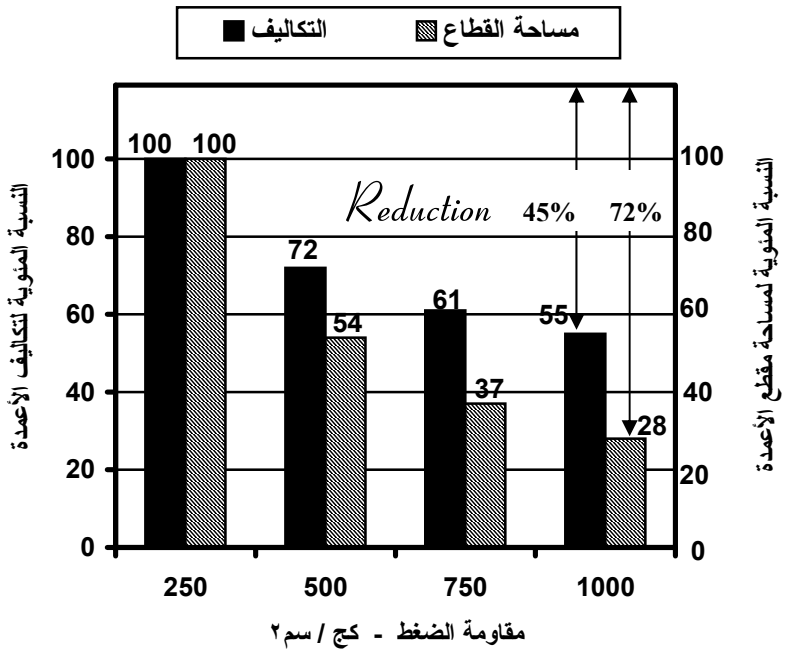
٣- **أثبتت الدراسات التحليلية أنه بالنسبة لعمود ذو مقطع ثابت و معرض إلى حمل ضغط محوري فإن هناك انخفاض فى نسبة حديد التسليح مقداره ٢,٢% لكل ١٠٠ كج/سم^{٢} زيادة فى مقاومة الضغط للخرسانة.**

٤- **إن الانخفاض الملحوظ فى أبعاد القطاع الخرسانى (خاصة فى الطوابق السفلى) ذو أهمية خاصة لخدمة الأغراض المعمارية وزيادة المساحة المستغلة (شكل ٣-٩).**

٥- **ثبات القطاع الخرسانى مع زيادة المقاومة يسمح بزيادة عدد الطوابق للمنشأ نفسه.**

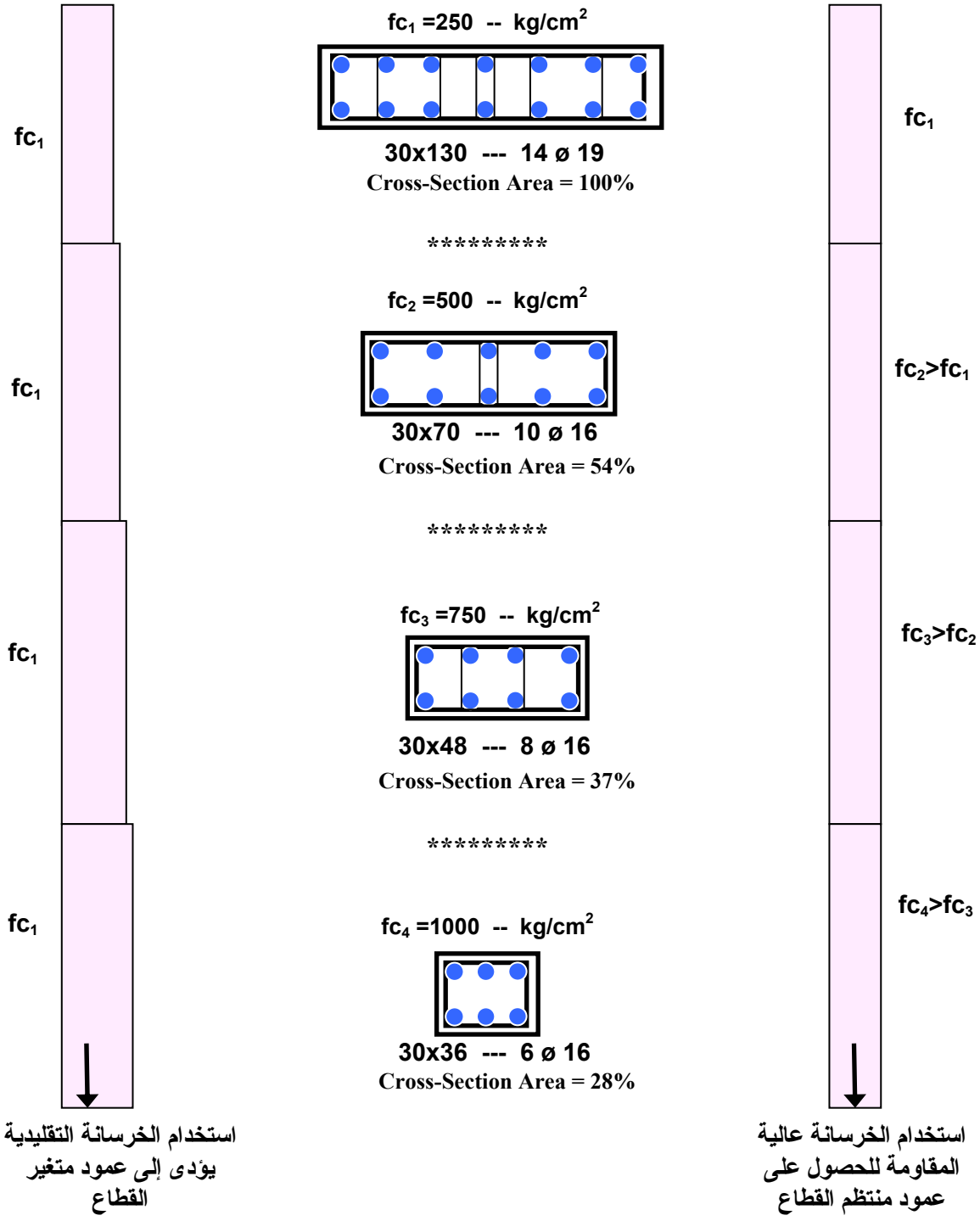


شكل (٣–٧) اقتصاديات الخرسانة عالية المقاومة فى الأعمدة.



شكل (٣–٨) انخفاض أبعاد القطاع الخرسانى فى الأعمدة.

❑ **المثال الآتى يوضح مدى الفوائد من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل قطاعات الأعمدة وكذلك تقليل كمية حديد التسليح المستخدمة. نفترض أن هناك عمود قصير يؤثر عليه حمل ضغط محوري مقداره ٤٠٠ طن والمطلوب تصميم قطاع العمود باستخدام خرسانات ذات مقاومة للضغط مقدارها ٢٥٠ ، ٥٠٠ ، ٧٥٠ ، ١٠٠٠ كج/سم^2 إذا علم أن مقاومة الخضوع للحديد تساوى ٢٤٠٠ كج/سم^2 وأن نسبة الحديد فى القطاع تساوى ١%.**



شكل (٣-٩) تأثير الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل قطاعات الأعمدة.

ثانياً العناصر المعرضة لعزوم إنحناء مثل الكمرات

إن استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى العناصر المعرضة لعزوم إنحناء مثل الكمرات لا ينتج عنه خفض كبير فى التكاليف كما فى حالة الأعمدة وإنما تكون الاستفادة فى هذه الحالة من الناحية الفنية أكثر من الناحية الاقتصادية. ويمكن تلخيص ذلك فى النقاط الآتية:

١- الاستفادة الاقتصادية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات تتحقق فقط عندما يتم تقليل عرض القطاع مع ثبات العمق وثبات نسبة حديد التسليح فى القطاع. فقد وجد أنه بزيادة مقاومة الضغط ثلاثة مرات فإن عرض القطاع يمكن أن يقل إلى حوالى الثلث كما تقل التكاليف النهائية بنسبة ١٤%.

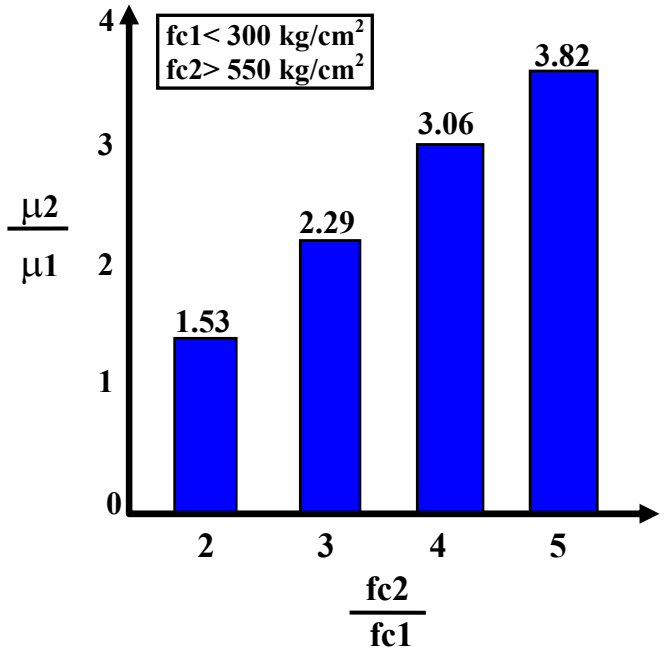
٢- إن استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات يستلزم زيادة نسبة الحديد الرئيسي حتى نتجنب حدوث انفعال زائد فى الحديد وبالتالى نتجنب حدوث شروخ أكثر وأوسع. ولقد وجد أنه عند زيادة مقاومة الخرسانة إلى الضعف فإن حديد التسليح ينبغي زيادته بنسبة ٥٣% كما هو واضح بشكل (٣-١٠) ، وذلك حتى نحصل على نفس قيمة الانفعال فى حديد التسليح.

٣- تتحقق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات وذلك بتقليل عمق القطاع وزيادة نسبة حديد التسليح. فقد وجد أنه عند زيادة مقاومة الضغط للخرسانة ثلاثة مرات فإن عمق القطاع يمكن أن يقل إلى حوالى ٦٤% من العمق الأصلي (شكل ٣-١١) ولكن نسبة الحديد تزيد وتصل إلى حوالى ٢٢٩% من النسبة الأصلية. وعليه فإن التكاليف تزيد بنسبة ٤٢%.

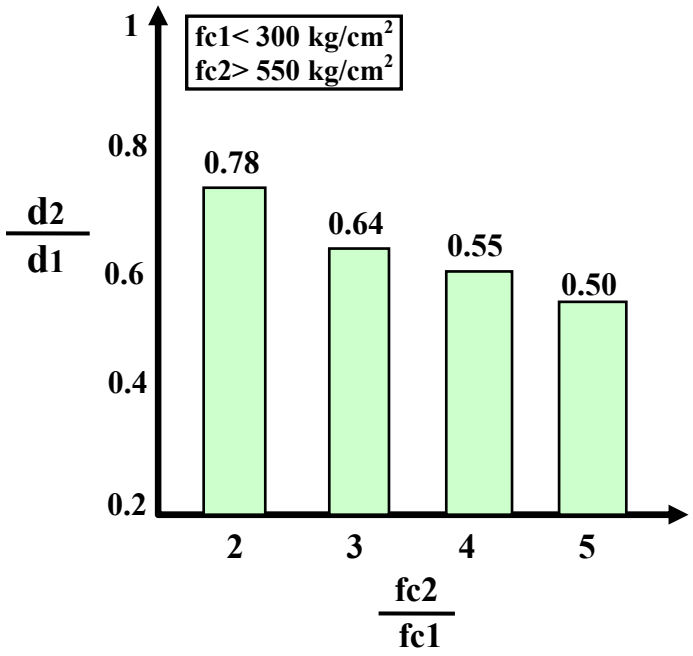
٤- أيضاً تتحقق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات وذلك بزيادة بحر الكمرة عند ثبات الحمل المؤثر وثبات القطاع الخرسانى. فقد وجد أنه يمكن زيادة بحر الكمرة إلى ١,٨ مرة عندما تزيد مقاومة الضغط للخرسانة ٤ مرات.

٥- شكل (٣-١٢) يوضح تحقيق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات من خلال زيادة السعة التحميلية للكمرة عند ثبات القطاع وزيادة نسبة حديد التسليح. فنجد أنه بزيادة مقاومة الضغط للخرسانة أربع مرات فإن السعة التحميلية لها تتضاعف ٣,٢٤ مرة.

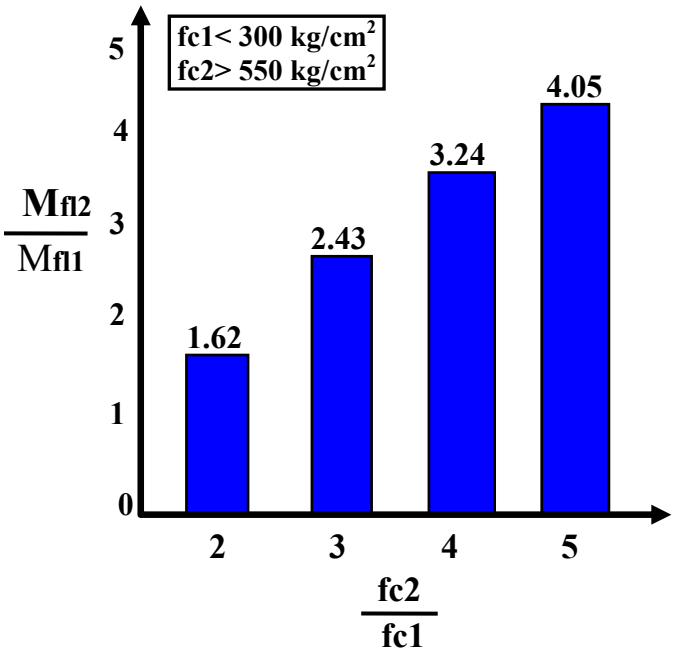
٦- يمكن إجراء تخفيض جزئي لكلٍ من عرض وعمق القطاع فى آن واحد كما هو مبين بشكل (٣-١٣) وذلك حتى يتم إسيفاء شروط التشغيل المختلفة.



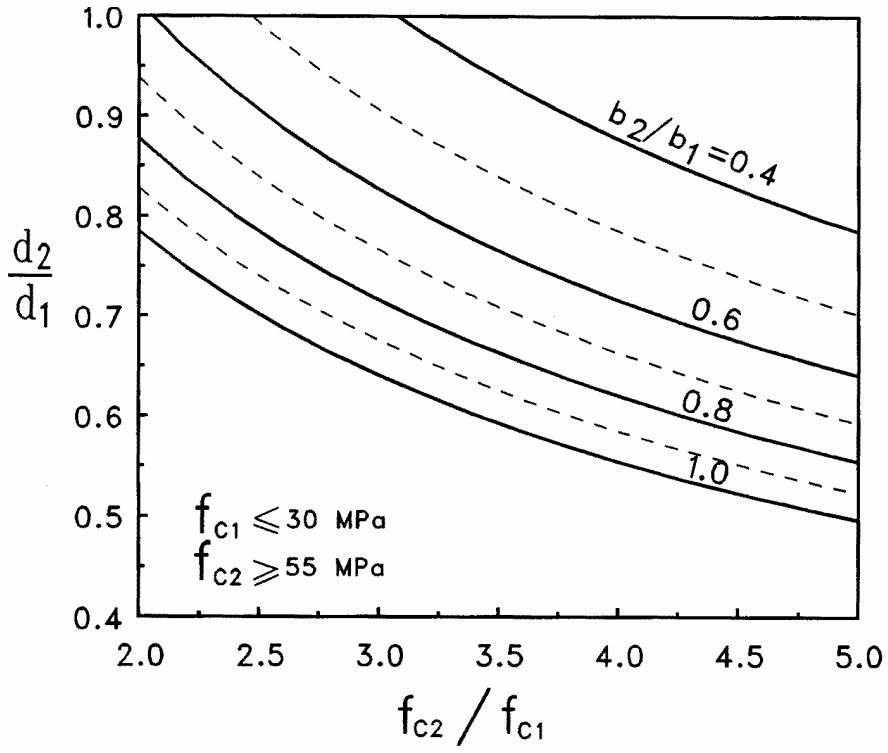
شكل (٣-١٠) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على نسبة الحديد الرئيسي فى الكمرات.



شكل (٣-١١) تأثير الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل عمق القطاع فى الكمرات.



شكل (٣-١٢) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على السعة التحميلية للكمرات.



شكل (٣-١٣) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على كلٍ من عرض وعمق القطاع فى الكمرات.

٣-٥-٤ المميزات العامة للخرسانة عالية المقاومة:

١- مقاومة الضغط فيها من ٦٠٠ إلى ١٤٠٠ كج/سم^{٢} (٥-٧ مرات مقاومة الخرسانة التقليدية).

٢- معاير المرونة يساوى تقريبا مرتين إلى مرتين ونصف معاير المرونة للخرسانة التقليدية مما يساعد فى تقليل الترخيم Deflection والتشكل Deformation.

٣- تمتاز بمتانة عالية Durability ومقاومة للاحتكاك ومقاومة للكيماويات.

٤- الفوائد الناتجة منها (مثل تقليل القطاعات وزيادة الأبحر وتقليل الوزن) أكثر من الزيادة فى تكاليف إنتاجها.

٥- تعطى مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن - وبالنسبة لوحدة الحجوم - وبالنسبة لوحدة الوزن Strength / unit weight - Strength / unit volume – Strength / unit Cost

ويمكن توضـيح النقطة السابقة كما يلي:

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن

خرسانة ذات مقاومة ٢٠٠ كج/سم^{٢} تتكلف مثلاً ٢٠٠ جنيه/م^{٣} يعنى ١,٠ كج/سم^{٢}/جنيه.
بينما خرسانة ذات مقاومة ٦٠٠ كج/سم^{٢} تتكلف ٣٠٠ جنيه/م^{٣} أى ٢,٠ كج/سم^{٢}/جنيه.

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الحجوم

قاعدة عمود من خرسانة مقاومتها ٢٠٠ كج/سم^{٢} يكون حجمها حوالى ٤م^{٣} يعنى ٥٠ كج/سم^{٢}/م^{٣}.
بينما قاعدة من خرسانة مقاومتها ٦٠٠ كج/سم^{٢} يكون حجمها حوالى ٢م^{٣} يعنى ٣٠٠ كج/سم^{٢}/م^{٣}.

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الوزن

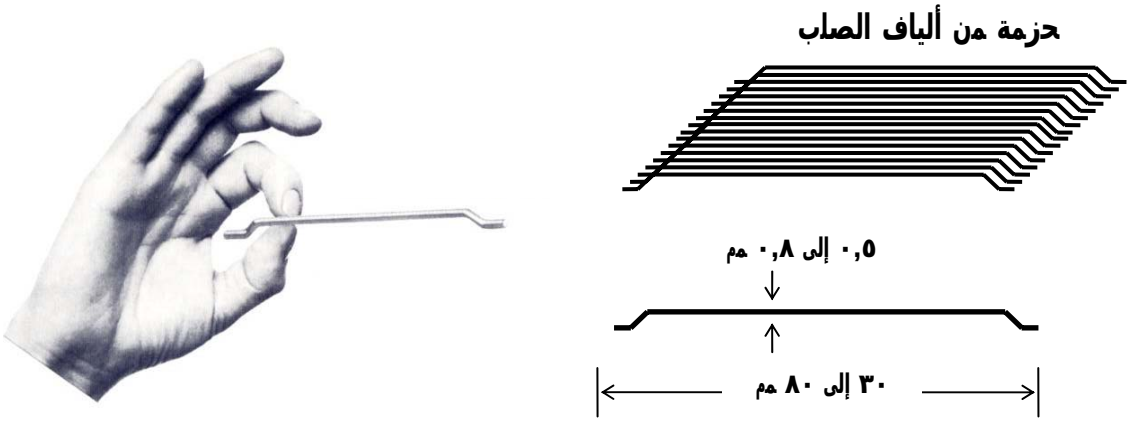
عمود من خرسانة ذات مقاومة ٢٠٠ كج/سم^{٢} يكون وزنة حوالى ٤ طن يعنى ٥٠ كج/سم^{٢}/طن.
بينما عمود من خرسانة مقاومتها ٦٠٠ كج/سم^{٢} يكون وزنة حوالى ٣ طن أي ٢٠٠ كج/سم^{٢}/طن.

ومن عيوب الخرسانة عالية المقاومة أنها أكثر قصافة Brittleness من الخرسانة التقليدية والانهيار بها مفاجئ حيث يكون الكسر فيها خلال الركام الكبير وليس حوله كما فى الخرسانة التقليدية ويمكن التغلب على هذه المشكلة بطرق عديدة منها استخدام الألياف مع الخرسانة. كذلك فإن استخدام الخرسانة عالية المقاومة يتطلب درجة عالية من ضبط الجودة والتحكم فيها.

٣-٦ الخرسانة الليفية Fiber Concrete

وهى الخرسانة المصنوعة من الأسمنت والركام و المحتوية على ألياف غير مستمرة و موزعة توزيعاً عشوائياً فى جميع الاتجاهات خلال الكتلة الخرسانية وتنقسم الألياف إلى قسمين رئيسيين من حيث النوع:

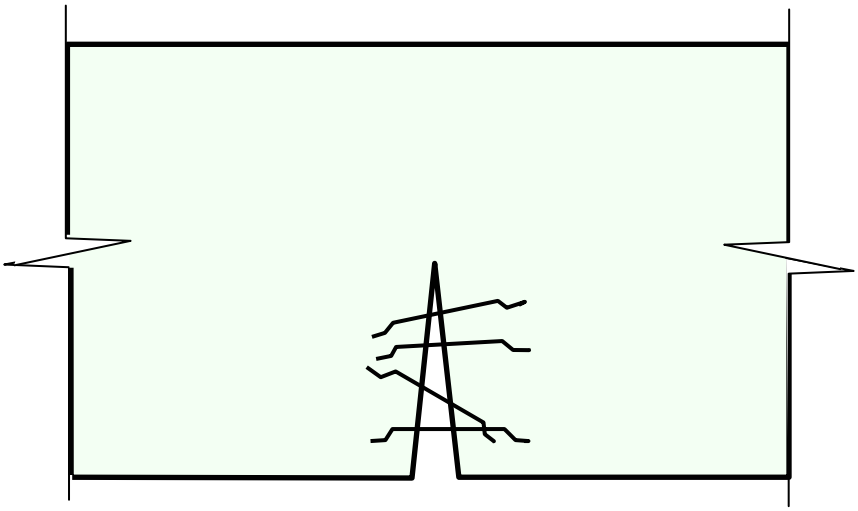
- ألياف الصلب وهى قطع من الصلب بطول ٣ إلى ٨سم وقطر من ٠,٥ إلى ٠,٨ مم كما بالشكل (٣-١٤).
- والألياف الصناعية مثل ألياف البولى بروبلين والبوليستر والبوليثيلين والأكريلك وتأخذ نفس شكل ألياف الصلب ولكنها مصنعة من مواد صناعية.



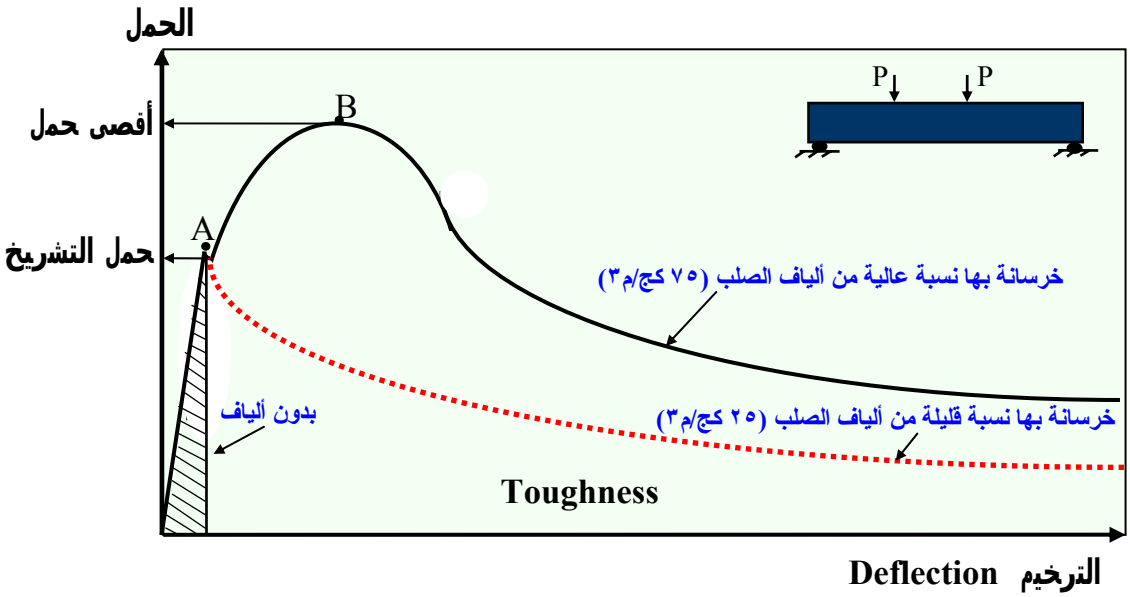
شكل (٣-١٤) ألياف صلب غير مستقيمة الأطراف.

والألياف لها القدرة على تحسين مقاومة الخرسانة فى القص والشد والانحناء والصدم والانكماش. كما أنها تعمل على تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها كما يتضح ذلك من الرسم الكروكى بشكل (٣-١٥)، ولكن الألياف لا تؤثر بدرجة كبيرة على مقاومة الضغط. وأهم وظيفة للألياف أنها تزيد من قيمة معاير المتانة للمادة زيادة كبيرة جداً. شكل (٣-١٦) يوضح منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية ومدى زيادة المتانة Toughness فى الخرسانة الليفية. وبالتالى فهي تحول ميكانيكية الكسر فى الخرسانة من كسر قصف مفاجئ وخطر Dangerous Sudden Failure إلى كسر غير قصف وتدريجي Ductile Failure. شكل (٣-١٧) يوضح مقارنة بين كمرتين متشابهتين من الخرسانة المسلحة (بدون كانات) أحدهما بدون ألياف والأخرى تحتوى على ألياف. ويتضح التأثير الكبير والفعال للألياف فى مقاومة قوى القص وزيادة معاير المتانة Toughness. وتستخدم الخرسانة الليفية على نطاق واسع فى الطرق والمطارات والمنشآت العسكرية وقواعد الماكينات. كما تستخدم فى الأسقف القشرية ومناطق

الاتصال بين الكمرة والعمود فى الإطارات. وتستخدم الألياف أيضاً فى المواسير الخرسانية والوحدات سابقة الصب و فى العناصر الخرسانية المعرضة لقوى القص والصدم. وبالرغم من أن الألياف تزيد من مقاومة قوى الشد فى الانحناء إلا أن هذه الزيادة غير جديرة بالاعتبار وبالتالى فإنه ليس من الحكمة أن تستخدم الألياف كبديل كلى أو إستعواضى لأسياخ صلب التسليح.



شكل (٣-١٥) دور الألياف فى تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها .



شكل (٣-١٦) منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية.

شكل (٣-١٧) تأثير الألياف الفعال فى مقاومة قوى القص وزيادة المتانة.

٣-٧ الخرسانة ذاتية الدمك Self-Compacting Concrete

٣-٧-١ تعريف :

الخرسانة ذاتية الدمك هى الخرسانة التى لها درجة عالية من السيولة والإنسياب Deformability كما أن لها مقاومة عالية للإنفصال الحبيبى Stability ويمكن صبها بنجاح فى القطاعات الضيقة والمزدحمة بحديد التسليح Filling Capacity وذلك بدون الإستعانة بأى وسيلة دمك خارجية.

وتعتبر الخرسانة ذاتية الدمك نتاج التقدم التكنولوجي فى مجال إضافات الخرسانة حيث تعتبر كل من إضافات تحسين اللزوجة وإضافات تقليل ماء الخلط (الملدنات الفائقة) هما العنصرين الأساسيين اللازمين لإنتاج هذه الخرسانة. ويعتبر اليابانيون هم رواد صناعة هذه الخرسانة حيث قاموا فى السنوات العشر الأخيرة باستخدامها فى منشآت وتطبيقات عديدة ومفيدة. بعد ذلك تم إنتاج هذه الخرسانة فى العديد من الدول مثل تركيا وأمريكا. وفى مصر تم حديثاً إجراء بعض الأبحاث فى جامعة المنصورة لإنتاج الخرسانة ذاتية الدمك باستخدام المواد المحلية كما تم دراسة المتطلبات الخاصة للقابلية للتشغيل وكذلك الاختبارات الخاصة والضرورية لهذه الخرسانة. وبصفة عامة فلقد أظهرت نتائج الاختبارات إمكانية صناعة الخرسانة ذاتية الدمك بالمواد المحلية المتاحة فى مصر بدرجة نجاح عالية. والبحث رقم ٣٨ بقائمة المراجع يختص بهذا الموضوع.

٣-٧-٢ الخواص المطلوب تحقيقها فى الخرسانة ذاتية الدمك:

أولاً: درجة إنسياب وسيولة عالية High Deformability

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- زيادة سيولة العجينة --- باستخدام الملدنات الفائقة و/أو استخدام نسبة عالية من ماء الخلط.

٢- تقليل الاحتكاك الداخلي بين الحبيبات --- بتقليل نسبة الركام الكبير فى الخلطة و/أو استخدام نسبة من البودرة الناعمة المتدرجة.

ثانياً: درجة مقاومة عالية للإنفصال الحبيبى Good Stability

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- تقليل الانفصال بين المواد الصلبة فى الخلطة عن طريق --- تقليل المقاس الإعتبارى الأكبر للركام و/أو تقليل نسبة الركام و/أو استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

٢- تقليل النضح (الماء الحر) إلى أقل درجة ممكنة عن طريق --- استخدام نسبة أقل من ماء الخلط و/أو استخدام بودرة ذات مساحة سطحية عالية و/أو زيادة نسبة إضافات تحسين اللزوجة.

ثالثاً: لها قدرة عالية على الصب والملء فى القطاعات الضيقة أو المزدحمة بحديد التسليح وذلك تحت تأثير وزنها وبدون حدوث إنسداد أو توقف للخرسانة Blockage

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- أن يكون لها مقاومة عالية للانفصال الحبيبي أثناء صب وتدفق الخرسانة عن طريق --- استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

٢- التوافق بين مقاس القطاعات والمسافة بين الأسياخ من ناحية ومقاس الركام الكبير ونسبته فى الخلطة من ناحية أخرى وذلك عن طريق --- تقليل المقاس الإعتبارى الأكبر للركام و/أو تقليل نسبة الركام فى الخلطة.

٣-٧-٣ مميزات الخرسانة ذاتية الدمك:

١- سهولة الصب فى القطاعات المزدحمة بحديد التسليح والقطاعات الضيقة.

٢- القدرة على صب كمية كبيرة من الخرسانة فى فترة زمنية قصيرة.

٣- تحتاج عمالة أقل.

٤- لا يوجد بها إنفصال حبيبى.

٥- لا تحتاج إلى إستخدام هزازات فى الموقع مما يؤدى إلى سهولة الصب والتغلب على مشكلة الضوضاء الناتجة عن الهزازات.

٦- لها شكل ومظهر أفضل كما أنها لا تحتاج إلى تسوية سطحها بعد صبها .

٧- لا تعطى فرصة للتدخل فى الموقع لإضافة ماء للخلطة نظراً لسيولتها.

٨- أكثر معمرية من الخرسانة التقليدية.

٣-٧-٤ الاختبارات المطلوبة والغرض منها:

وتجدر الإشارة أنة بالنسبة للخرسانة ذاتية الدمك فإن تحقيق متطلبات وخواص الخرسانة الطازجة يكون له الأولية إذا قورن بمتطلبات وخواص الخرسانة المتصلدة حيث تعتبر المرحلة الطازجة هنا هى الغاية المنشودة ومن ثمّ توجد إختبارات خاصة لقياس خواص المرحلة الطازجة من الخرسانة ذاتية الدمك وفيما يلى نبذة مختصرة وسريعة عن بعض هذه الإختبارات:

١- إختبار الإنسياب الحر Slump Flow

وذلك لقياس الإنسياب الحر فى حالة عدم وجود عوائق فى طريق الخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز مخروط الهبوط التقليدى الموضح فى الباب السابع من هذا الكتاب. ويلزم أن يكون قطر الإنسياب فى حدود من ٦٠ إلى ٧٠سم.

٢- إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test

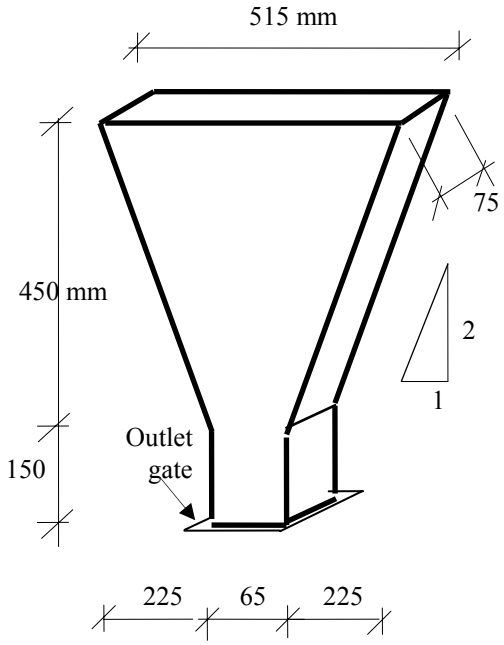
ويقيس قدرة الخرسانة على تغيير مسارها والإنتشار خلال منطقة ضيقة بدون حدوث إنسداد أو توقف. ويستحدم لذلك الجهاز الموضح بشكل (٣-١٨) حيث يتم قياس زمن مرور الخرسانة بالكامل فى القمع ، وهذا الزمن يجب أن لا يتجاوز عشر ثوان.

٣- إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity

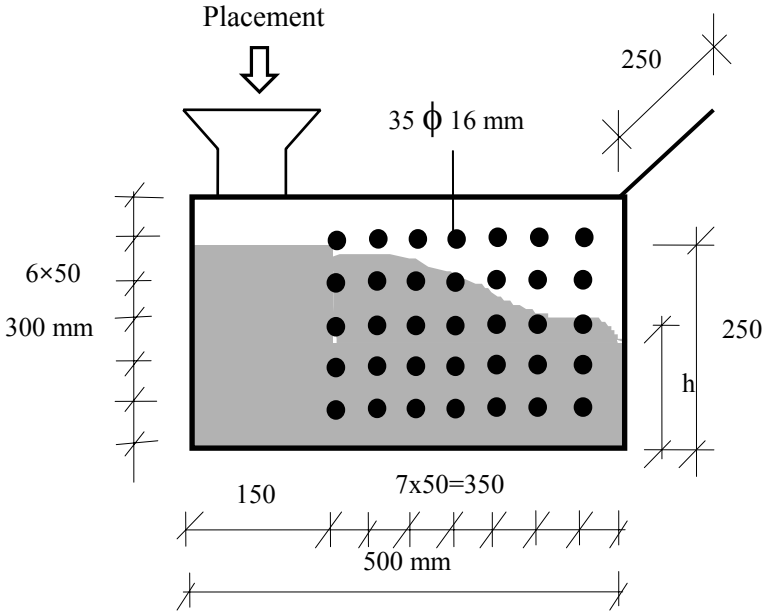
وذلك لقياس قدرة الخرسانة على الصب والتدفق فى وجود منطقة مزدحمة بحديد التسليح دون حدوث توقف أو إنسداد للخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز خاص كما هو مبين بشكل (٣-١٩) حيث يتم قياس النسبة المئوية للخرسانة التى تملء الصندوق والتى ينبغى أن لاتقل عن ٨٠%.

٤- رصد الهبوط فى سطح الخرسانة Surface Settlement

وذلك لقياس الثبات فى الخرسانة بعد الصب وحتى حدوث التصلب. حيث ينبغى بقاء الركام معلق فى العجينة دون حدوث هبوط. وتستخدم أجهزة القياس الميكانيكية للتحكم فى رصد الحركة النسبية لسطح الخرسانة.



شكل (٣–١٨) الجهاز المستخدم فى إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test



شكل (٣–١٩) الجهاز المستخدم فى إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity Test

٣-٨ الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش) Shotcrete

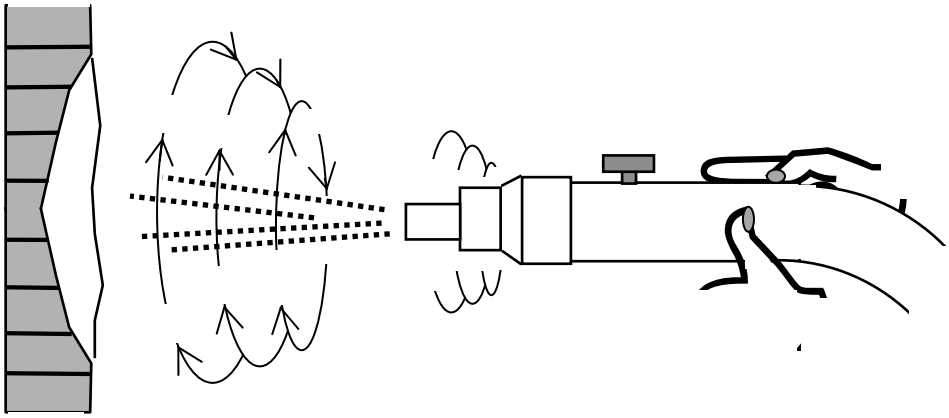
هى خرسانة (أو مونة) تقذف بضغط الهواء من فوهة القاذف بسرعة عالية إلى السطح المراد تغطيته بالخرسانة. وتستخدم غالبا فى أعمال الإصلاحات والترميم Repair وتبطين الأنفاق Tunnels وتبطين الترع وفى كثير من الأحوال التى يصعب فيها إستخدام الطرق التقليدية فى الصب فمثلاً عندما يكون مطلوب صب طبقات غير سميكة أو متغيرة السمك أو عندما يصعب الوصول إلى منطقة العمل أو عندما يكون إستخدام الشدات صعباً أو مكلفاً. كما تستخدم الخرسانة المقذوفة فى إصلاح الخرسانة المتداعية فى الكبارى والأهوسة والسدود والمنشآت المواجهة للمياه وكذلك مبانى الطوب المتآكلة. كما تستخدم فى تبطين الأفران بكافة أنواعها.

ويوجد نوعين رئيسيين لطريقة تنفيذ الخلطة ، أسلوب الخلط الجاف وأسلوب الخلط المبتل. ففى الطريقة الجافة يتم خلط الركام و الأسمنت وأى مكونات أخرى على الجاف أولاً وتدفع بإستخدام ضغط الهواء خلال القاذف ثم يضاف الماء عند فوهة القاذف ويدفع الجميع إلى السطح المراد صبه. أما فى الطريقة الرطبة فيتم خلط جميع المكونات بما فيها الماء خلطاً جيداً أولاً (ماعدا معجلات الشك إن وجدت) ويدفع الجميع بإستخدام ضغط الهواء خلال القاذف إلى السطح المراد قذفه. وفى جميع الأحوال يلزم إعداد السطح المقذوف عليه الخرسانة لضمان جودة ترابطها معه. ويمكن القول أن خواص وسلوك الخرسانة المقذوفة يعتمد كثيراً على صفات المعدات المستخدمة وعلى مهارة القائمين بها كما يعتمد على الظروف التى يتم بها الصب.

و تتميز خلطة الخرسانة المقذوفة بإحتوائها على محتوى أسمنت أعلى لتعويض نسبة الفقد منه عند الإرتداد من السطح. كذلك فإن ركامها يتميز بصغر المقاس حيث يفضل أن لايزيد عن ١٢ مم. كما أنها قد تحتوى على إضافات معينة (ماعدا المؤجلات Retarders) لتحسين بعض الخواص المرغوبة وغالباً فإن الخرسانة المقذوفة تحتوى على المعجلات Accelerators وذلك لتسريع عملية الشك للخرسانة المقذوفة. ويفضل أن تكون فوهة القاذف عمودية على السطح المقذوف ولا تتعدى زاوية ميل القاذف على السطح ٤٥ درجة وذلك لضمان التوزيع المنتظم للخرسانة ولتجنب حدوث تكور و دحرجة للخرسانة على السطح مما يؤدى إلى سطح متعرج غير منتظم. كما يفضل أن تكون المسافة بين فوهة القاذف والسطح فى حدود ٠,٦ إلى ١,٨ متر. شكل (٣-٢٠) ، شكل (٣-٢١) يوضحان إستخدام الخرسانة المقذوفة و التحكم فى القاذف.

ويعيب هذه الخرسانة تعرضها للإنكماش بقيمة كبيرة نتيجة لكثرة كمية الماء بها وكذلك زيادة محتوى الأسمنت مع نقص الركام الكبير. كما يعيب هذه الخرسانة أيضاً إحتمال عدم الإلتصاق والتماسك التام بمادة السطح الذى ترش فوقة وللتغلب على مشكلة الإنكماش يمكن إستخدام الألياف مع هذه الخرسانة والتى أثبتت نجاحاً كبيراً فى الوقت الحال.

شكل (٣-٢٠) صورة توضح إستخدام الخرسانة المقذوفة فى أحد الأنفاق.



حركة دورانية خفيفة فى فوهة الدفع لإنتاج خرسانة مقذوفة جيدة

شكل (٣-٢١) كروكى يوضح طريقة قذف الخرسانة والتحكم فى فوهة الدفع.

٣-٩ الخرسانة البوليمرية Polymer-Concrete

البوليمر أو الراتنج هو إسم لمادة عضوية تتكون من العديد من الجزيئات المتشابهة ذات الوزن الجزيئى المرتفع والجزئ الواحد من هذه الجزيئات يسمى مونومر.

أما الخرسانة الراتنجية فهى خرسانة خاصة يتم الحصول عليها بمعاملة الخرسانة العادية بمواد البوليمر التى تعمل كمواد لاحمة أومالئة للفراغات بين حبيبات الركام. وتمثل المواد البوليمرية حوالى ٦ إلى ١٥% من وزن الخرسانة ومن أمثلتها مواد أو مركبات البوليستر Polyester و الأيبوكسى Epoxy وقد تصل تكاليف خرسانة البوليمرز حوالى من ٢ - ٣ مرات تكاليف الخرسانة العادية وتمتاز بالآتى:

- مقاومة عالية للعوامل الخارجية مثل مقاومة التآكل ونفاذ الماء والمقاومة للكبريتات.
- مقاومة عالية جداً للإنكماش.
- مقاومة ضغط عالية قد تصل إلى ١٢٠٠ كج/سم^{٢}
- مقاومة شد تصل إلى ١٠٠ كج/سم^{٢}

وعموماً يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من الخرسانة المحتوية على راتنجات:

١- الخرسانة البلاستيكية	(PC)	Plastic Concrete
٢- الخرسانة البوليمرية الأسمنتية	(PCC)	Polymer Cement Concrete
٣- الخرسانةالأسمنتية المحقونة بالبوليمرات	(PIC)	Polymer Impregnated Concrete

٣-٩-١ الخرسانة البلاستيكية PC

وفيها تحل الراتنجات محل الأسمنت كمادة رابطه لجزيئات الركام. أى أنها عبارة عن ركام متماسك مع بعضه بواسطة مادة رابطة من البوليمرات. والخرسانة البلاستيكية لها خواص ميكانيكية عالية وزمن معالجتها قصير ولها إنكماش متناهى فى الصغر ومقاومة عالية للكيماويات وتتوقف الخواص على نوع الراتنج المستخدم وكميته فى الخلطة ومن أهم الأنواع المستخدمة:

- الأيبوكسى
- البولى إستر
- الفينول فورمالدهيد
- فورفورال أستيون

وهذه الخرسانة لها مقاومة تزيد بدرجة كبيرة عن الخرسانة الأسمنتية وتتوقف الزيادة على نوع الراتنج المستخدم وكميته فى الخلطة (أنظر شكل ٣-٢٢).

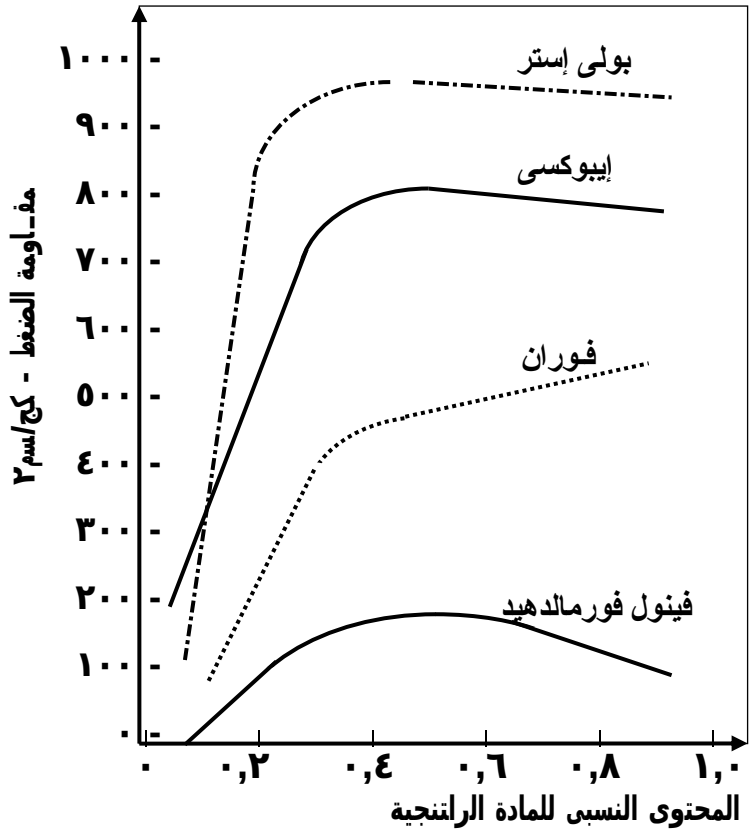
أهم تطبيقات الخرسانة البلاستيكية

١- طبقة حماية سطحية لأسطح الكبارى والمصانع وأماكن الخدمات والسلالم والخرسانة المسلحة و سابقة الإجهاد.

٢- ترميم الخرسانات التى حدث بها شروخ نتيجة الحرارة أو الإنكماش أو الأهتزازات.

٣- لصق الخرسانة الحديثة والقديمة أو الوحدات سابقة الصب.

٤- لصق الخرسانة على المعادن كطريقة للتقوية والتسليح الخارجى.



شكل (٣-٢٢) مقاومة الضغط لبعض الأنواع من الخرسانة البلاستيكية.

٣-٩-٢ الخرسانة البوليمرية الأسمنتية PCC

وهى التى تصنع بخلط الأسمنت والركام ويضاف اليها ماء الخلط المضاف إلية الراتنج. أى أنها خرسانة تقليدية مع إحلال جزء من ماء الخلط بواسطة مواد راتنجية. والراتنج المضاف يكون فى عبوتين: إحداهما تحتوى على المونومر والأخرى تحتوى على المصلد اللازم للتفاعل الكيميائى وإتمام عملية البلمرة (إتحاد الجزيئات) وتتم عملية البلمرة أثناء عملية التصلد للخرسانة. ومن ثم تتكون شبكة مستمرة من البوليمرات تملء أغلب فراغات الخرسانة. ويجب لذلك الحذر بأن لاتعطل عملية البلمرة طور الإماهة للأسمنت. ومن أهم المونومرات الشائعة الإستخدام كإضافة للخرسانة:

١- فينيل اسيتات	٢- الإكريلات
٣- فينيل كلوريد	٤- مستحلبات البيتومين
٥- المطاط	٦- الإيبوكسيات

وتجدر الإشارة إلى أن العلماء الروس قد توصلوا إلى خرسانة أسمنتية بوليمرية ذات خواص عالية وذلك بإدماج فورفريل الكحول "Furfryl Alcohol" وهيدروكلوريد الإيثيلين فى خليط الخرسانة مما نتج عنه خرسانة كثيفة ومعدومة الإنكماش تقريباً وذات مقاومة عالية للصدأ وذات مسامية منخفضه ومقاومة للإهتزازات. وعموما فإن النتائج التى تم الحصول عليها نتيجة إستخدام المونومرات كإضافات للخرسانة العادية أثناء الخلط قد أعطت تأثيرا محدودا على خواصها الميكانيكية وإن كان التأثير أكثر وضوحا على القوام والقابلية للتشغيل.

٣-٩-٣ الخرسانة الأسمنتية المحقونة بالبوليمرات PIC

وهى الخرسانة الأسمنتية المتصلدة والتى سبق صبها ويتم حقنها أو غلغلتها بواسطة مونومرات ذات لزوجة منخفضة ثم تتم البلمرة لهذه المونومرات بعد ذلك وهى داخل الخرسانة وتنقسم إلى ثلاثة أنواع:

أ - الخرسانة المغلغلة كليا :

وتستخدم لمقاومة درجات الحرارة العالية أو عند التعرض إلى المياه المالحة. وفيها يتم بدء تنشيط عملية البلمرة وذلك أما بالإشعاع Radiation أو بالحرارة Thermal method وأهم المونومرات التى تستخدم فى هذه الطريقة هى:

- المثيل ميثا كريلات	Methyl methacrylate
- الستيرين	Styrene
- الكلوروستيرين	Chlorostyrene

وقد أوضحت التجارب أن الخرسانة المغلغلة بالمثيل ميثاكريلات والتى تتم بلمرتها بالإشعاع لها مقاومة ضغط تصل إلى حوالى ٣٠٠ % عند درجة تشبع بالبولميرات مقدارها ٦,٦ %. وأوضحت النتائج أيضا أن هناك زيادة وتحسينات مناظرة لكل من مقاومة الشد ومعاير المرونة ومقاومة التجمد والذوبان ومقاومة البرى والتفاذية ومقاومة الكيماويات.

ب - الخرسانة المغلغلة جزئيا:

وقد تم عمل هذه الخرسانة كأسلوب لتبسيط عملية الغلغلة وتقليل التكاليف وذلك لإستيفاء التطبيقات التى تتطلب المتانة أكثر من القوة وأهم المواد المستخدمة فى هذه الطريقة هى البولى إسترسترين و الميثيل ميثاكريلات وتتأثر خواص الخرسانة الناتجة بدرجة كبيرة بعمق الغلغلة بالبوليمر وبالتالى مقدار التشبع به. وبصفة عامة فإن الخرسانة المغلغلة جزئيا تعطى نتائج عالية جداً وإن كانت أقل نسبيا من الخرسانة المغلغلة كليا.

ج - الخرسانة المغلغلة سطحيا:

وهى شبيهة بالخرسانةالمغلغلة جزئيا وإن كانت المونومرات المستخدمة فى هذه الطريقة لها لزوجة منخفضه وبالتالى فهى أكثر تطاير ولها معدلات بطيئة فى الإختراق داخل الخرسانة وهذه الطريقة من الغلغلة مناسبة لكبارى الطرق السريعة.

تطبيقات الخرسانة المغلغلة بالبوليمر

١- خرسانة محطات تنقيه المياه المالحة (مقاومة الحرارة + المواد الكيماوية)
٢- أرضيات الكبارى السابقة الإجهاد
٣- الدعامات الخرسانية لأسقف مناجم الفحم
٤- الأنفاق والمنشآت تحت الماء
٥- قواعد المضخات والمنشآت البحرية والخرسانات الخفيفة
٦- مواسير المجارى والضغط

٣-١٠ الخرسانة الخفيفة Lightweight Concrete

من أهم عيوب الخرسانة التقليدية (٢٢٠٠ إلى ٢٥٠٠ كج/م^3) كمادة إنشائية بالمقارنة مع الخشب والحديد أن الخرسانة التقليدية ثقيلة الوزن نسبياً حيث تكون نسبة الوزن الذاتى لأجزاء المبنى Own weight بالمقارنة مع الأحمال المؤثرة هى نسبة عالية فى جميع الأحوال. ولذلك تم التفكير فى إنتاج وإستخدام خرسانة خفيفة وزنها أقل من ٢٠٠٠ كج/م^3. ولذلك فقد أمكن تصنيع خرسانة إنشائية تزن ١٤٠٠ إلى ١٩٠٠ كج/م^3 بزيادة بسيطة فى التكاليف وكذلك إنتاج خرسانة نصف انشائية للبلوكات الداخلية تزن ٩٠٠ كج/م^3 وتستعمل بكفاءة كحوائط داخلية. وعموماً فإن الخرسانة الخفيفة هى تلك التى يقل وزنها عن ٢٠٠٠ كج/م^3. والغرض من إستخدامها هو تقليل وزن المنشأ وبالتالى تقليل تكاليف الأساسات وكذلك لأغراض العزل الحرارى والصوتى.

أنواع الخرسانة الخفيفة

يمكننا تخفيض وزن الخرسانة عن طريق واحد أو أكثر من الطرق الآتية:

١- إيجاد فراغات بين حبيبات الركام (خرسانة خالية من المواد الرفيعة Finless Concrete)

٢- إيجاد فراغات داخل الركام (خرسانة ذات ركام خفيف Lightweight Aggregate Concrete)

٣- إيجاد فراغات داخل العجينة الأسمنتية (الخرسانة المهواة أو الخلوية Cellular Concrete)

٣-١٠-١ خرسانة خالية من المواد الرفيعة Finless Concrete

تتكون من الأسمنت والركام الكبير فقط وأحيانا يستخدم فيها الهواء عن طريق إضافة مواد رغوية أو بإستعمال تدرجات خاصة من الركام. والركام الكبير يمكن أن يكون زلط أو أحجار مكسرة أو ركام خفيف. وينحصر تدرج الركام بين ١٠ مم ، ٢٠ مم ولا تتعدى نسبة المار من المنخل الصغير عن ٥% وهذا النوع من الخرسانة ذو كثافة تتراوح من ٣/٢ إلى ٤/٣ كثافة الخرسانة التقليدية المصنوعة من نفس الركام. وهذا النوع يحتاج إلى تصميم دقيق وخصوصاً بالنسبة لمحتوى الماء.

٣-١٠-٢ خرسانة الركام الخفيف Lightweight Aggregate Concrete

خرسانة الركام خفيف الوزن هى أكثر أنواع الخرسانات الخفيفة شيوعاً وإستخداماً إذ يمكن إستعمالها كخرسانة إنشائية. والركام المستخدم فى الخرسانة الإنشائية الخفيفة هو فى أغلب الأحوال ركام صناعى. وصناعة الركام تعتبر أحد أجزاء التصنيع للخرسانة الخفيفة ومن أمثلة الركام الخفيف:

- الطين الممدد (الليكا) - الفيرموكليت - الفوم (بوليسترين)

شكل (٣- ٢٣) يوضح بعض أنواع الركام خفيف الوزن.

الصفات الواجب توافرها فى الركام الخفيف

١- يجب أن تكون حبيبات الركام متجانسة من حيث التركيب والصفات.
٢- „ „ „ „ „ „ „ ذات وزن نوعى منخفض.
٣- „ „ „ „ „ „ „ ذات مقاومة مناسبة (عامل مؤثر على مقاومة الخرسانة).
٤- „ „ „ „ „ „ „ ذات قدرة على التماسك مع حبيبات الأسمنت.
٥- „ „ „ „ „ „ „ ذات مقاومة جيدة للعوامل الجوية.
٦- يجب أن تحتوى الحبيبات على أكبر عدد ممكن من الفراغات الداخلية الصغيرة المنفصلة وعلى أقل عدد ممكن من الفراغات الكبيرة المتصلة.

٣-١٠-٣ الخرسانة المسواة (ذات الخلايا) Cellular Concrete

وفى هذا النوع تتكون فقاعات من الغازات والهواء فى وسط الخرسانة وهى فى الحالة الطازجة ويظل التركيب مسامى بعد أن تشك الخرسانة. والطريقتين الرئيسيتين لإنتاج هذا النوع هما:

أ - انتاج غازات فى الخلطة بتفاعلات كيميائية

ب- إضافة مواد رغوية للخلطة.

ومن المواد الشائعة المولدة للغازات المسحوق الناعم من بودرة الألمونيوم أو بودرة الزنك (٠,٢% من وزن الأسمنت) وعند خلطها بالأسمنت تتكون فقاعات من الهيدروجين فتنتفخ الكتلة مكونة عند تصلدها مادة ذات تركيب خلوى. وتجدر الإشارةإلى أن هناك علاقة طردية بين وزن الخرسانة ومقاومتها للضغط.

شكل (٣-٢٣) بعض انواع الركام خفيف الوزن.

٣-١١ الخرسانة الثقيلة Heavy Weight Concrete

وهى خاصة بالوقاية من الإشعاع الذرى والنووى حيث تتناسب قدرة الخرسانة لإمتصاص هذه الإشعاعات مع وزنها أو كثافتها وبالتالى تكون حوائط وبلاطات الأرضيات والأسقف من الخرسانة الثقيلة. وتصنع الخرسانة الثقيلة من ركام من مواد ثقيلة من خامات الحديد أو خام الرصاص. وتجدر الإشارة أن خام الحديد يعطى خرسانة وزنها من ٣٠٠٠ إلى ٤٠٠٠ كج/م^{٣} ، وقد تستخدم قطع من الحديد كركام وتصل كثافة خرسانتة الى ٥٦٠٠ كج/م^{٣}. ومن الممكن أيضاً إستخدام النواتج الثانوية للفرن العالى مثل جلخ المحولات الأكسجينية وخردة سى لإنتاج خرسانة ذات كثافة حوالى ٢٨٠٠ كج/م^{٣}. ويستخدم فى بعض الأحيان ركام من صخر السربنتين (سليكات الماغنسيوم المماهة) وبصفة عامة فلابد لركام الخرسانة ثقيلة الوزن أن يوفى بمتطلبات الكثافة والتركيب وذلك للوقاية من الإشعاع . ويستخدم الأسمنت البورتلاندى العادى ولكن يفضل الأسمنت منخفض الحرارة فى حالة الخرسانة الكتلية ثقيلة الوزن كما لا يستخدم الأسمنت سريع التصلد. أيضاً لا تستخدم إضافات المعجلات أو إضافات الهواء المحبوس وإنما يمكن إستخدام الملدنات و المؤجلات.

ونظراً لأن الركام المكون من قطع الحديد يميل دائماً إلى الإنفصال عند خلطه أو صبه بالطرق التقليدية فإنه يفضل إستخدام الخرسانة الثقيلة سابقة الرص Prepacked Concrete والتى تعتبر أكثر مناسبة فى هذه الحالة. وتصنع الخرسانة سابقة الرص من دفع وضخ المونة خلال فراغات ركام نظيف ومرصوص و مدموك جيداً و مشبع بالماء. وعندما تضخ المونة خلال القوالب أو الفرم فتزيح ما بها من ماء وهواء وتملأ الفراغات وبذلك تنتج خرسانة ذات كثافة عالية بها نسبة عالية من الركام. ويميز هذه الخرسانة سهولة صبها فى بعض المناطق أو الأحوال التى يصعب فيها صب الخرسانة التقليدية.

٣-١٢ الخرسانة الكتلية Mass Concrete

وهى خرسانة ذات كتل كبيرة مثل خرسانة السدود والخزانات الأرضية أو أى خرسانة بحيث يكون حجمها من الكبر بحيث يتطلب ذلك أخذ الإحتياطات من تولد الحرارة الناتجة من إماهة الأسمنت وما يتبع ذلك من إنكماش وتشريخ للخرسانة. ويستخدم فى الخرسانة الكتلية ركام كبير قد يصل مقاسه حوالى ١٥ سم. ونظرا لوجود حرارة تفاعل عالية من الأسمنت فإنه ينبغى أخذ بعض الإحتياطات الضرورية مثل:

- إستخدام أسمنت من النوع منخفض الحرارة Low heat.
- إستخدام محتوى قليل من الأسمنت خلطة فقيرة Lean mix.
- إحلال نسبة من ١٠ إلى ٢٠% من الأسمنت بمادة بوزولانية مثل غبار السلسكا أو الرماد المتطاير.
- إستخدام الثلج المجروش بدلاً من جزء من ماء الخلط و تسمى هذه العملية بالتبريد السابق.
- وجود مواسير رفيعة من الصلب رقيق الجدران داخل الكتلة الخرسانية تمرخلالها دورات من الماء البارد لخفض الحرارة و تسمى هذه العملية بالتبريد اللاحق.
- الصب على طبقات قليلة الإرتفاع بحد أقصى واحد متر.
- العزل السطحى للخرسانة برقائق من البوليسترين أو اليوريثان وذلك بغرض تنظيم معدل هبوط الحرارة (وليس خفض الحرارة) بحيث يقل فرق الإجهاد الناتج من الهبوط السريع لدرجة الحرارة عند سطح الخرسانة وداخلها.

****

الباب الثالث

الأنواع المختلفة (الخاصة) من الخرسانة

Special Types of Concrete

يوجد العديد من أنواع الخرسـانة ويمكن تصنيف أهم هذه الخرسانات كما يلي:

Plain Concrete	١- الخرسانة العادية
Reinforced Concrete	٢- الخرسانة المسلحة
Prestressed Concrete	٣- الخرسانة سابقة الإجهاد
Precast Concrete	٤- الخرسانة الجاهزة (سابقة الصب)
High Strength Concrete	٥- الخرسانة عالية المقاومة
Fibrous Concrete	٦- الخرسانة الليفية
Self-Compacting Concrete	٧- الخرسانة ذاتية الدمك
Polymer Concrete	٨- الخرسانة البوليمرية
Shotcrete	٩- الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش)
Light-Weight Concrete	١٠- الخرسانة الخفيفة
Heavy-Weight Concrete	١١- الخرسانة الثقيلة
Mass Concrete	١٢- الخرسانة الكتلية
Prepacked Concrete	١٣- الخرسانة المعبأة
Gap Concrete	١٤- خرسانة الركام ناقص التدرج
Architectural Concrete	١٥- الخرسانة المعمارية
Nailing Concrete	١٦- خرسانة التسمير
Sulfur Concrete	١٧- الخرسانة الكبريتية

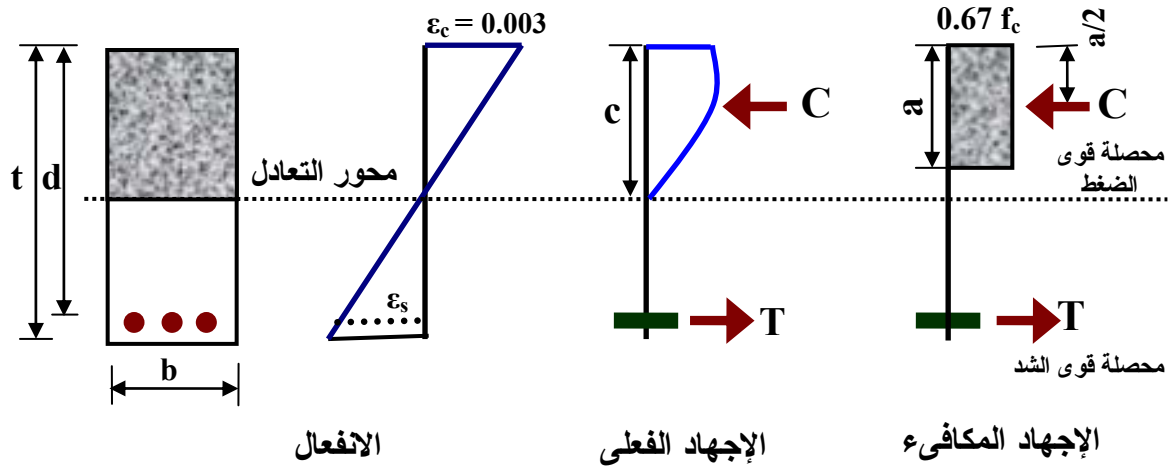
فيما يلي نبذة مختصرة عن أهم هذه الأنواع:

٣-١ الخرسانة العادية Plain Concrete

وهى خرسانة بدون أي حديد تسليح وتستخدم فى أعمال الفرشات الخرسانية تحت الأساسات والأرصفة وعمل الكتل الخرسانية الغير معرضة لإجهادات شد وعمل الأرضيات والسدود. ومقاومتها تتراوح من ١٥٠ إلى ٢٥٠ كج/سم^{٢} حسب الغرض المستخدمة من أجله. ويمكن تحسين بعض الخواص فيها لكي تناسب غرض الاستخدام ، مثلاً أن تكون مقاومة للكبريتات أو مقاومة لعوامل التعرية والتآكل كما فى حالة المصدات البحرية.

٣-٢ الخرسانة المسلحة Reinforced Concrete

وهى خرسانة عادية ويشترك معها حديد تسليح لمقاومة إجهادات الشد وهذا النوع من الخرسانة هو الأكثر شيوعاً واستخداماً فى العالم وذلك لسهولة تنفيذه ورخص تصنيعه. ويمكن أن يُصب فى الموقع مباشرة أو يُصب فى المصنع لعمل وحدات خرسانية جاهزة. وينبغي تحقيق الاتزان Equilibrium و التوافق Compatibility بين الإجهادات و الانفعالات فى كل من الخرسانة و الحديد. ومعظم كودات التصميم تهمل تماماً مقاومة الخرسانة للشد وبالتالى فإن الحديد يتحمل كل قوى الشد المؤثرة ، أما الخرسانة فتتحمل قوى الضغط. شكل (٣-١) يوضح توزيع الإجهادات والانفعالات على قطاع مستطيل من الخرسانة المسلحة.



شكل (٣-١) الإجهاد والإنفعال لعنصر من الخرسانة المسلحة ذو قطاع مستطيل معرض لعزم إنحناء .

٣-٣ الخرسانة سابقة الإجهاد Prestressed Concrete

وهى خرسانة عادية يتم إكسابها إجهادات ضغط قبل تحميلها وهذه الإجهادات تكون كفيلة بملاشاة إجهادات الشد الناتجة من تأثير الأحمال وبالتالى لا نحتاج إلى حديد تسليح حيث تكون المحصلة النهائية للإجهادات على طول القطاع الخرسانى بعد التحميل (التشغيل) هى غالباً إجهادات ضغط وبالتالى تكون الخرسانة كفيلة بتحملها. وبناءاً عليه يجب أن تكون الخرسانة ذات مقاومة عالية للضغط تتراوح من ٣٥٠ إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢} وذلك حتى يمكنها تحمل إجهادات ضغط التصنيع وإجهادات ضغط التشغيل. وأسياخ الصلب المستخدمة فى الخرسانة سابقة الإجهاد تسمى كابلات Tendons وهى عبارة عن أسلاك Wires أو حبال مجدولة من مجموعة أسلاك Strands أو قضبان من الصلب Bars. وتمتاز الخرسانة سابقة الإجهاد بقلة الشروخ السطحية مع مقاومة عالية للأحمال. وهى مناسبة للاستخدام فى الكبارى والمستودعات المائية والوحدات الجاهزة مثل فلنكات السكك الحديدية وأعمدة التلغراف. وعموماً يوجد طريقتان لإكساب الخرسانة لإجهادات الضغط:

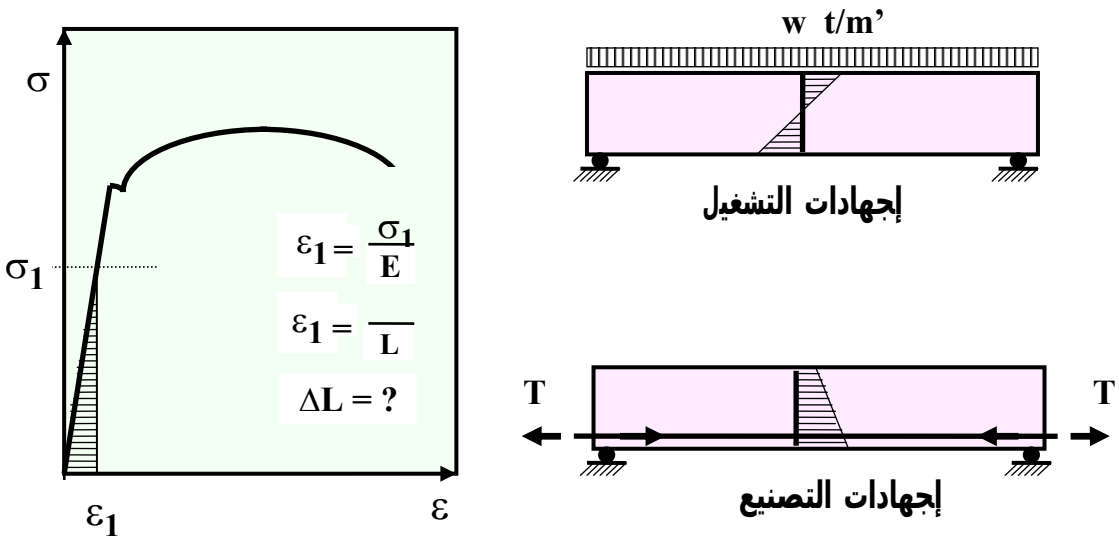
أ- طريقة الشد السابق Pre-tension

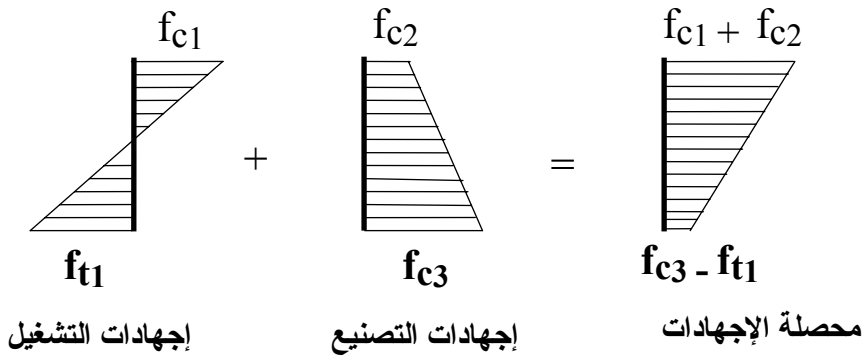
وفيها يتم شد كابلات الصلب قبل صب الخرسانة وقبل تصلدها. وتترك هذه الكابلات مشدودة (فى حدود المرونة) حتى تتصلد الخرسانة وتكتسب مقاومتها القصوى ثم بعد ذلك يتم رفع وإزالة قوى الشد من الصلب الذى يحاول أن ينكمش داخل الخرسانة المتصلدة مما يؤدى إلى حدوث إجهادات ضغط فى الخرسانة عن طريق قوى التماسك بين الحديد و الخرسانة كما بشكل (٣-٢). وتستخدم طريقة الشد السابق فى إنتاج الوحدات سابقة الصب سابقة الإجهاد حيث تسمح المعالجة بالبخار واستخدام خرسانة عالية المقاومة المبكرة فى الإزالة المبكرة لتلك الوحدات والاستغلال اليومي للقوالب.

ب- طريقة الشد اللاحق Post-tension

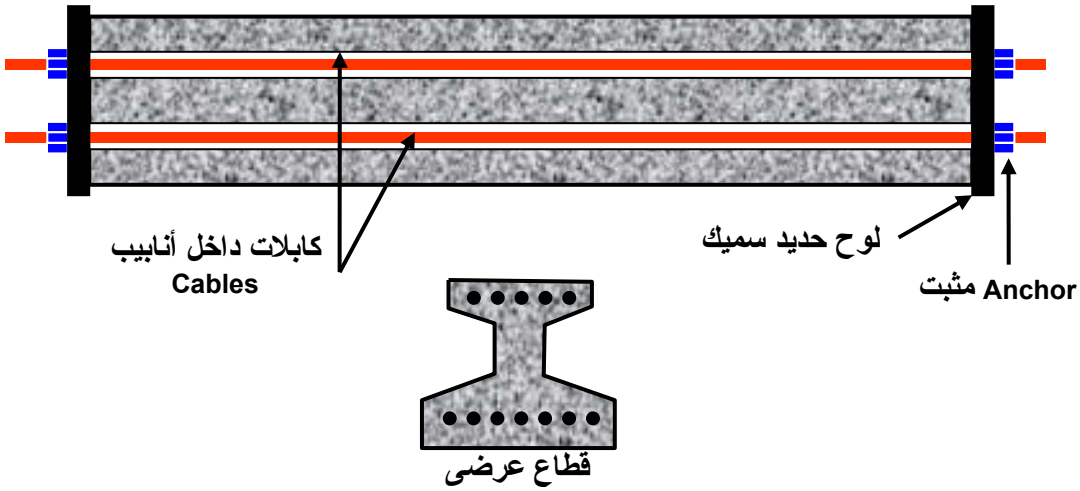
وفيها يتم عمل أنابيب مفرغة (مواسير أو أجربة) داخل الخرسانة وتوضع كابلات الصلب حرة الحركة بداخلها بدون شد حتى تتصلد الخرسانة تماماً (شكل ٣-٣). يتم شد الكابلات بعد تصلد الخرسانة حيث لا يكون هناك أى قوى تماسك بين الصلب و الخرسانة. بعد ذلك يتم رفع وإزالة قوى الشد من الصلب حيث يسبب إجهادات ضغط على ألواح الصلب المثبتة فى طرفى العنصر الخرسانى والتى تنتقل بدورها إلى الخرسانة بالتحميل. بعد ذلك تملأ الفراغات بين كابلات الصلب والمواسير بمونة الجراوت التى تتصلد وتقلل من فرصة صدأ صلب الكابلات.

هذا وفى الكود المصري لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة ـ طبعة ٢٠٠١ـ فقد تم تخصيص الباب العاشر للخرسانة سابقة الإجهاد حيث التعرف على كافة الاعتبارات الخاصة بالمواد المستخدمة فى هذه الخرسانة وتصميم قطاعاتها ونظم التحليل الإنشائى لها و التفتيش وضبط الجودة الخاص بهذه الخرسانة.





شكل (٣-٢) توضيح لطريقة الشد السابق.



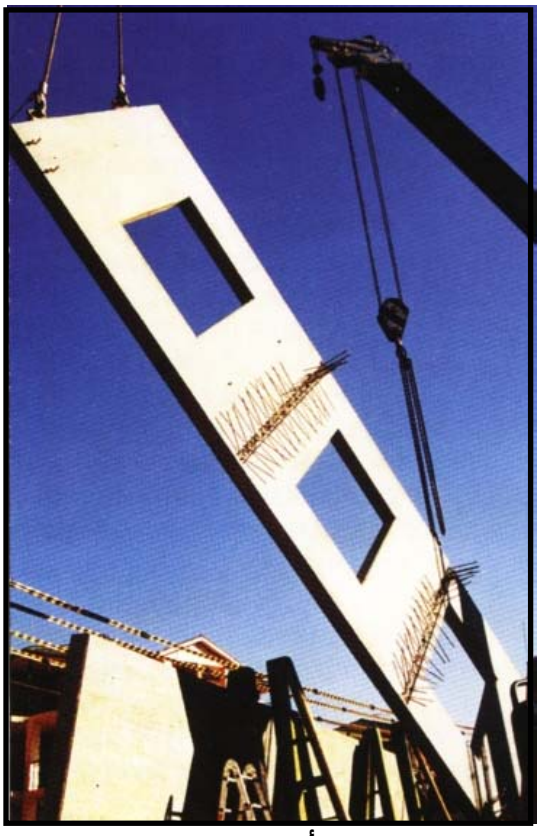
شكل (٣-٣) توضيح لطريقة الشد اللاحق.

٣-٤ الخرسانة الجاهزة (سابقة الصب) Precast Concrete

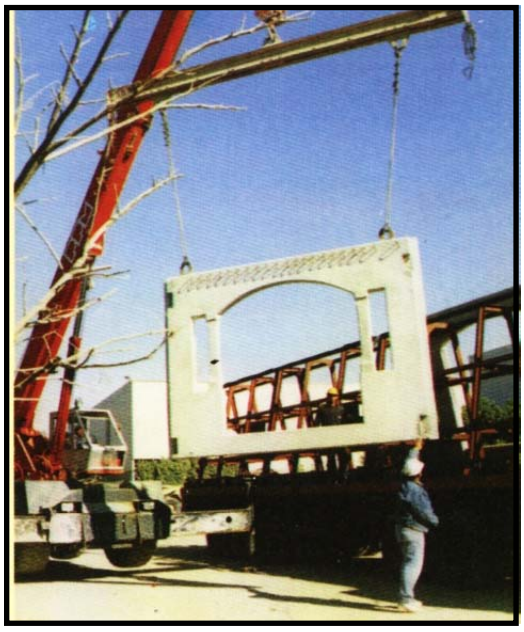
تصب الخرسانة وتعالج حتى تمام تصلدها فى المصنع ثم بعد ذلك تنقل إلى المنشأ وممكن أن تكون خرسانة عادية أو مسلحة أو سابقة الإجهاد وتشمل البلاطات والأعمدة والحوائط والبلوكات الخرسانية والفلنكات ووحدات الأسوار والسلالم. وفيها يتم التحكم فى عملية جودة الخرسانة والتصنيع مثل:

١- استخدام ركام جيد متدرج
٢- تقليل الماء
٣- إجراء الدمك والخلط ميكانيكا
٤- معالجة بالبخار
٥- استخدام إضافات للتلوين
٦- استخدام المواد العازلة المطلوبة

وتوضح الأشكال (٣-٤) ، (٣-٥) بعض التطبيقات التى تستخدم فيها الخرسانة سابقة الصب بنجاح. وعند تصنيع العناصر المختلفة من الخرسانة الجاهزة فيجب الأخذ فى الاعتبار كافة الأحمال الخارجية المؤثرة على العنصر فى مراحل التصنيع والتخزين والنقل و التركيب والتنفيذ والاستخدام.



حائط خرساني ثلاثة أدوار بارتفاع ٩,٨ متر.



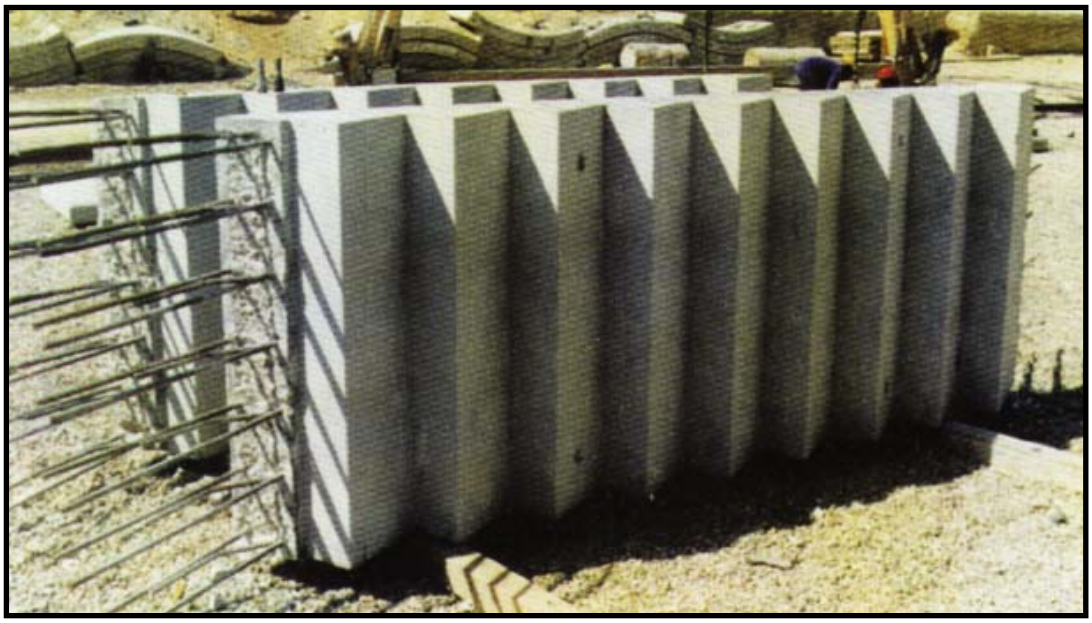
حائط خرساني ذو شكل معماري مميز.

شكل (٣-٤) بعض الحوائط من الخرسانة سابقة الصب .

سور من الخرسانة سابقة الصب بمدينة السادس من أكتوبر

مجارى خرسانية لتصريف مياه الأمطار
(نفق الأزهر)

حلقات خرسانية ذات تجويف بقطر ٨,٣٥ متر
(مترو أنفاق القاهرة)



سلالم خرسانية سابقة الصب (فندق الميريديان)

شكل (٣-٥) بعض التطبيقات المختلفة للخرسانة سابقة الصب .

٣-٥ الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete

وهى خرسانة ذات مقاومة تزيد عن ٦٠٠كج/سم^{٢} وقد تصل أو تزيد عن ١٤٠٠كج/سم^{٢} ويمكن الحصول عليها باستخدام المواد المحلية المتاحة والتى تستخدم فى صناعة الخرسانة التقليدية (٢٥٠كج/سم^{٢}) من ركام وأسمنت وماء إلا أن الخرسانة عالية المقاومة تحتوى على مادة إضافية أخرى وهى الملدنات Superplasticizers وذلك حتى يمكننا تقليل ماء الخلط إلى أقصى درجة مع الحصول على نفس القابلية للتشغيل وبالتالى الحصول على المقاومة العالية (أنظر البابين الأول والثانى). أما المواد البوزولانية مثل مادة غبار السيليكا Silica fume فقد توجد أولا توجد فى كلٍ من نوعىّ الخرسانة. إن أهم شىء يجب أخذه فى الاعتبار عند إنتاج خرسانة عالية المقاومة هو اختيار مجموعة المواد التى تتجانس مع بعضها لتعطى خرسانة جيدة لها المقاومة و المتانة وكذلك القابلية للتشغيل المطلوبة.

٣-٥-١ الخصائص المطلوب توافرها فى المكونات:

أ- الركام الكبير يجب أن يكون قوى ومتين لأنه يعمل كعامل يحدد مقاومة الخرسانة القصوى حيث أن الشروخ فى حالة الخرسانة عالية المقاومة تمر خلال حبيبات الركام الكبيرة وليس حولها كما فى حالة الخرسانة التقليدية. وقد وجد أن الخرسانة المصنوعة من الصخر (مثل الجرانيت أو الدولوميت) تعطى مقاومة أكبر بحوالى ١٠ إلى ٢٠% من تلك المصنوعة من الزلط.

ب- الركام الصغير أو الرمل يجب أن يكون خشن نوعاً ما حيث يكون معاير النعومة له من ٢,٨ إلى ٣,٠ وذلك لأن الخلطة تكون غنية بالمواد الناعمة مثل الأسمنت وغبار السيليكا إن وجدت.

ج- الأسمنت يجب أن يكون عالي الجودة وأن يكون متوافق مع أي إضافات مستخدمة. ولقد وجد أن النسبة المثلى التى تعطى أكبر مقاومة للخرسانة تقع بين ٤٥٠ إلى ٥٠٠كج/م^{٣} (٩ : ١٠ شكاير). ويعتمد ذلك على خصائص وكميات ونسب باقي المكونات وعما إذا كانت الخلطة تحتوى على مادة غبار السيليكا أم لا.

د- غبار السيليكا Silica fume وهى مادة بوزولانية تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج من تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية وبالتالى زيادة المقاومة وتحسين النفاذية. وعموماً فإن الزيادة فى مقاومة الضغط بتأثير مادة غبار السيليكا قد لا تتجاوز ٢٠%. وتجدر الإشارة أن النسبة المثلى من غبار السيليكا تتراوح من ١٠ إلى ١٥% من وزن الأسمنت.

هـ- الملدنات Superplasticizers وهى أهم مكون للحصول على خرسانة عالية المقاومة حيث بواسطتها نستطيع خفض نسبة ماء الخلط إلى ٠,٢٥ من وزن الأسمنت فقط وبالتالى يمكننا الحصول على أعلى مقاومة. ويجب عمل تحقيق وتأكد من مدى توافق هذه المادة مع الأسمنت المستخدم.

٣-٥-٢ تطبيقات الخرسانة عالية المقاومة

ظل استخدام الخرسانة عالية المقاومة فترة طويلة محصوراً فى عدة تطبيقـــــــات تقليـدية Classical Applications هدفها الأوحد هو استغلال قيمة المقاومة العالية فى الحصول على أقل مساحة قطاع وأقل حجم للمنشأ وكذلك أقل وزن للمنشأ. ولذلك كانت هذه التطبيقات محددة فى ثلاثة أشياء رئيسية هى:

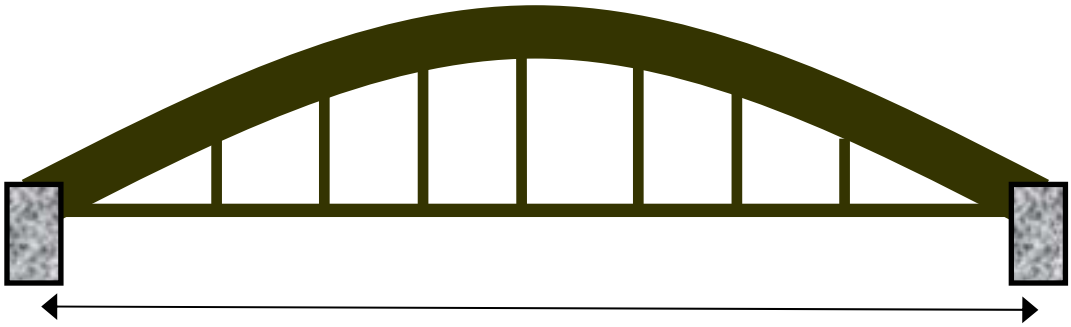
* المباني عالية الارتفاع High Rise Buildings
* الكبارى Bridges
* المنشآت البحرية Offshore Structures

وحديثاً تم استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تطبيقات أخرى متنوعة (شكل ٣-٦) للاستفادة بطريقة مباشرة أو غير مباشرة من مميزاتها العديدة. وهذه التطبيقات قد تأخذ اسم "تطبيقات غير تقليدية" Non-Classical Applications ومن هذه التطبيقات:

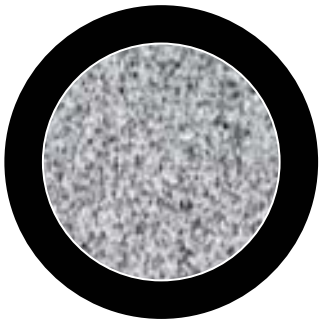
* الحصول على مقاومة مبكرة عالية High Early Strength
* إعادة إحياء العناصر الإنشائية القديمة مثل الأرش Arch Girder
* استخدامها مع قطاعات الحديد لزيادة جساءة المنشأ Improving Stiffness
* عمل خوازيق لولبية لتنفيذها بدون إهتزازت أو ضوضاء Screwing Piles
* محطات الطاقة النووية Nuclear Power Plants
* الأنابيب الخرسانية تحت الأرض Underground Concrete Pipes
* الأرصفة والطرق Pavements

ملحوظة :

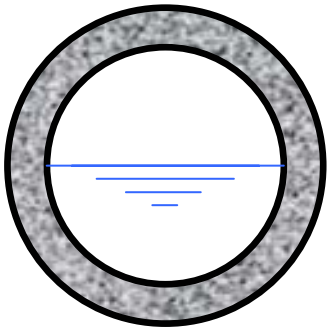
ينبغي أن نفرق بين الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete فالخرسانة عالية الأداء هى الخرسانة التى لها صفات وخصائص معينة تسمح لها بالعمل فى وسط محدد وفى ظروف معينة. والخصائص التى تميز الخرسانة عالية الأداء عن الخرسانات الأخرى قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة الطازجة مثل القابلية للتشغيل أو القوام أو قد تتضمن بعض خصائص الخرسانة المتصلدة مثل مقاومة البرى والخدش أو المقاومة للصقيع أو المقاومة للانكماش. وهذه الخصائص قد تكون منفصلة أو مجتمعة بحيث تعطى خرسانة لها أداء مختلف عن أداء الخرسانة التقليدية المعتادة. والخرسانة عالية الأداء لا يشترط فيها أن تكون عالية المقاومة.



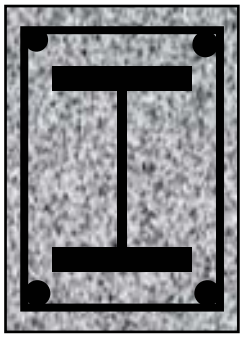
أرش Arch Girder



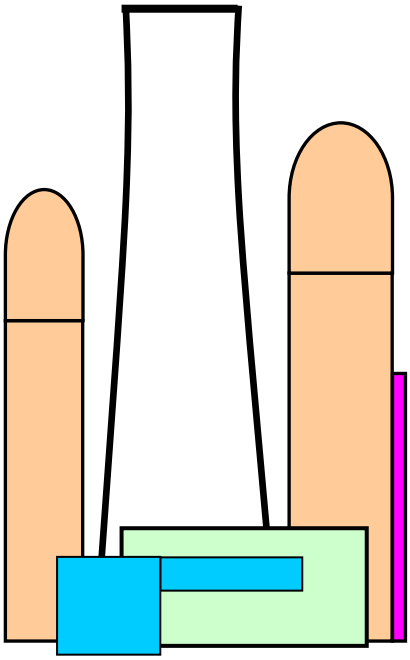
الأنابيب المعدنية المملوءة بالخرسانة



أنابيب المياه تحت الأرض



القطاعات المركبة



محطات الطاقة النووية

شكل (٣-٦) بعضاً من التطبيقات غير التقليدية للخرسانة عالية المقاومة.

٣-٥-٣ الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى مصر

إن الخرسانة عالية المقاومة تحتاج إلى تكلفة أكثر نتيجة استخدام مواد ذات جودة عالية وكذلك ثمناً للإضافات المستخدمة وأيضاً لضبط الجودة العالي. وبالرغم من ذلك فقد ثبت عملياً أن استخدام الخرسانة عالية المقاومة يكون له عائد إقتصادى أو عائد فنى كبير بالمقارنة بالخرسانات التقليدية الأخرى. ولقد تم دراسة هذه النقطة فى عدة أبحاث تختص بدراسة الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الأعمدة والكمرات وذلك تحت الظروف والأسعار الموجودة فى مصر. ومن الأبحاث التى تناولت هذه النقطة بالتحليل الأبحاث رقم ٢٧ ، ٢٨ ، ٢٩ بقائمة المراجع. وفيما يلي عرض موجز لأهم النتائج فى هذا الصدد.

أولاً العناصر المعرضة لقوى ضغط مثل الأعمدة

إن الجدوى من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى العناصر المعرضة لقوى ضغط مثل الأعمدة تكون أقصى ما يمكن حيث يمكن الاستفادة من ذلك اقتصاديا (بتوفير التكاليف) وفنياً (بعمل تخفيض فى المساحات والمقاطع) ويمكن تلخيص ذلك فى النقاط الآتية:

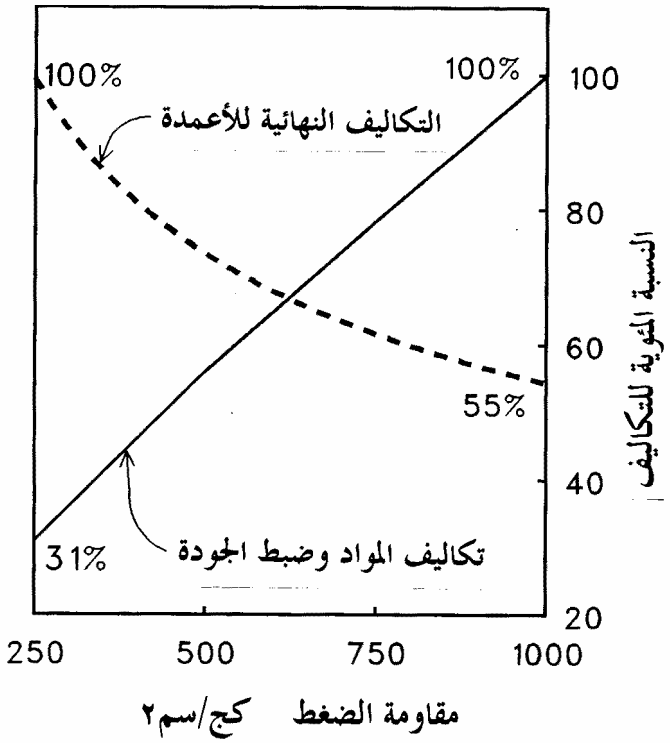
١- **على الرغم من زيادة تكاليف المتر المكعب من الخرسانة عالية المقاومة وكذلك زيادة تكاليف ضبط الجودة إلا أن التكاليف النهائية للعمود تقل كثيراً. فباستخدام خرسانة مقاومتها للضغط ١٠٠٠ كج/سم^{٢} فإن التكاليف النهائية للأعمدة تصل إلى حوالى ٥٥% فقط من التكاليف فى حالة استخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط ٢٥٠ كج/سم^{٢} كما هو مبين بشكل (٣-٧).**

٢- **مساحة القطاع الخرسانى للأعمدة المعرضة إلى حمل ضغط محوري تقل إلى ما يقرب من ٥٤% و ٣٧% نتيجة استخدام خرسانة ذات مقاومة للضغط تساوى ٥٠٠ كج/سم^{٢} و ٧٥٠ كج/سم٢ بدلاً من ٢٥٠ كج/سم^{٢} على الترتيب (أنظر شكل ٣-٨ ، شكل ٣-٩).**

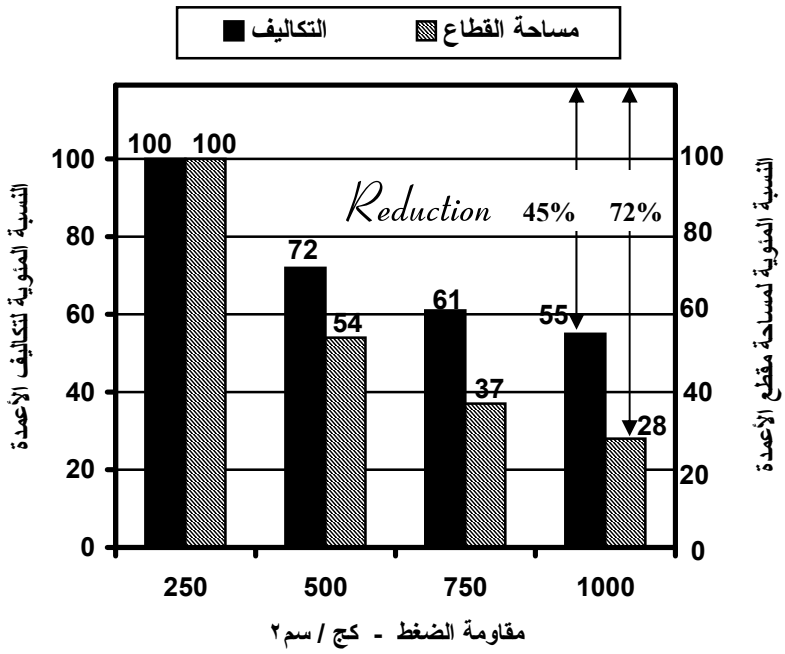
٣- **أثبتت الدراسات التحليلية أنه بالنسبة لعمود ذو مقطع ثابت و معرض إلى حمل ضغط محوري فإن هناك انخفاض فى نسبة حديد التسليح مقداره ٢,٢% لكل ١٠٠ كج/سم^{٢} زيادة فى مقاومة الضغط للخرسانة.**

٤- **إن الانخفاض الملحوظ فى أبعاد القطاع الخرسانى (خاصة فى الطوابق السفلى) ذو أهمية خاصة لخدمة الأغراض المعمارية وزيادة المساحة المستغلة (شكل ٣-٩).**

٥- **ثبات القطاع الخرسانى مع زيادة المقاومة يسمح بزيادة عدد الطوابق للمنشأ نفسه.**

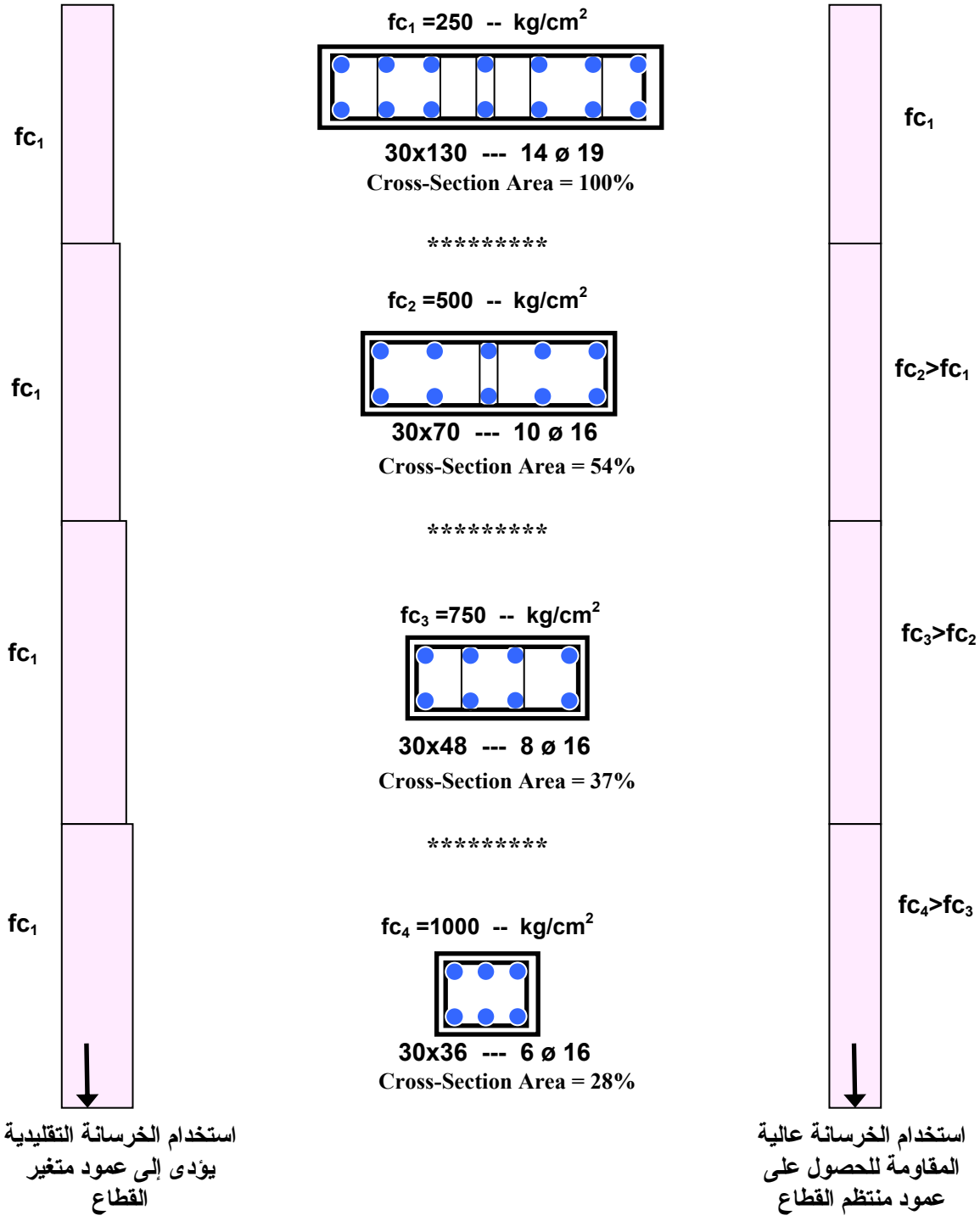


شكل (٣–٧) اقتصاديات الخرسانة عالية المقاومة فى الأعمدة.



شكل (٣–٨) انخفاض أبعاد القطاع الخرسانى فى الأعمدة.

❑ **المثال الآتى يوضح مدى الفوائد من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل قطاعات الأعمدة وكذلك تقليل كمية حديد التسليح المستخدمة. نفترض أن هناك عمود قصير يؤثر عليه حمل ضغط محوري مقداره ٤٠٠ طن والمطلوب تصميم قطاع العمود باستخدام خرسانات ذات مقاومة للضغط مقدارها ٢٥٠ ، ٥٠٠ ، ٧٥٠ ، ١٠٠٠ كج/سم^2 إذا علم أن مقاومة الخضوع للحديد تساوى ٢٤٠٠ كج/سم^2 وأن نسبة الحديد فى القطاع تساوى ١%.**



شكل (٣-٩) تأثير الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل قطاعات الأعمدة.

ثانياً العناصر المعرضة لعزوم إنحناء مثل الكمرات

إن استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى العناصر المعرضة لعزوم إنحناء مثل الكمرات لا ينتج عنه خفض كبير فى التكاليف كما فى حالة الأعمدة وإنما تكون الاستفادة فى هذه الحالة من الناحية الفنية أكثر من الناحية الاقتصادية. ويمكن تلخيص ذلك فى النقاط الآتية:

١- الاستفادة الاقتصادية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات تتحقق فقط عندما يتم تقليل عرض القطاع مع ثبات العمق وثبات نسبة حديد التسليح فى القطاع. فقد وجد أنه بزيادة مقاومة الضغط ثلاثة مرات فإن عرض القطاع يمكن أن يقل إلى حوالى الثلث كما تقل التكاليف النهائية بنسبة ١٤%.

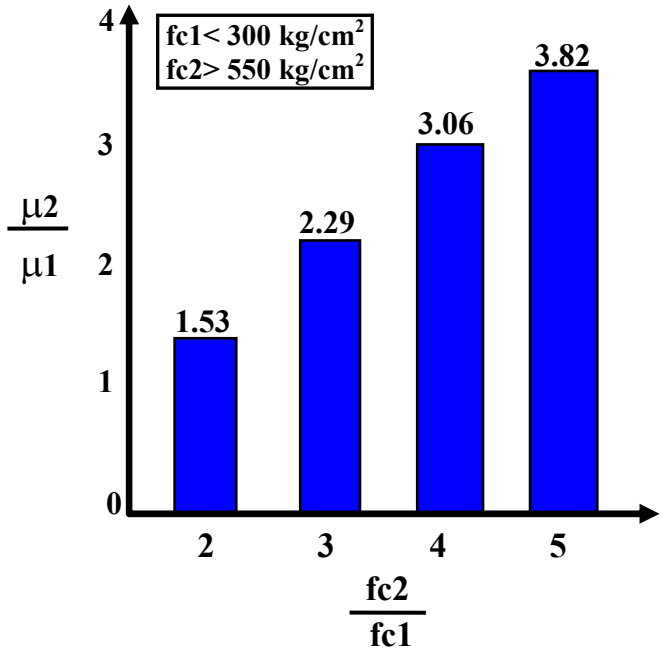
٢- إن استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات يستلزم زيادة نسبة الحديد الرئيسي حتى نتجنب حدوث انفعال زائد فى الحديد وبالتالى نتجنب حدوث شروخ أكثر وأوسع. ولقد وجد أنه عند زيادة مقاومة الخرسانة إلى الضعف فإن حديد التسليح ينبغي زيادته بنسبة ٥٣% كما هو واضح بشكل (٣-١٠) ، وذلك حتى نحصل على نفس قيمة الانفعال فى حديد التسليح.

٣- تتحقق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات وذلك بتقليل عمق القطاع وزيادة نسبة حديد التسليح. فقد وجد أنه عند زيادة مقاومة الضغط للخرسانة ثلاثة مرات فإن عمق القطاع يمكن أن يقل إلى حوالى ٦٤% من العمق الأصلي (شكل ٣-١١) ولكن نسبة الحديد تزيد وتصل إلى حوالى ٢٢٩% من النسبة الأصلية. وعليه فإن التكاليف تزيد بنسبة ٤٢%.

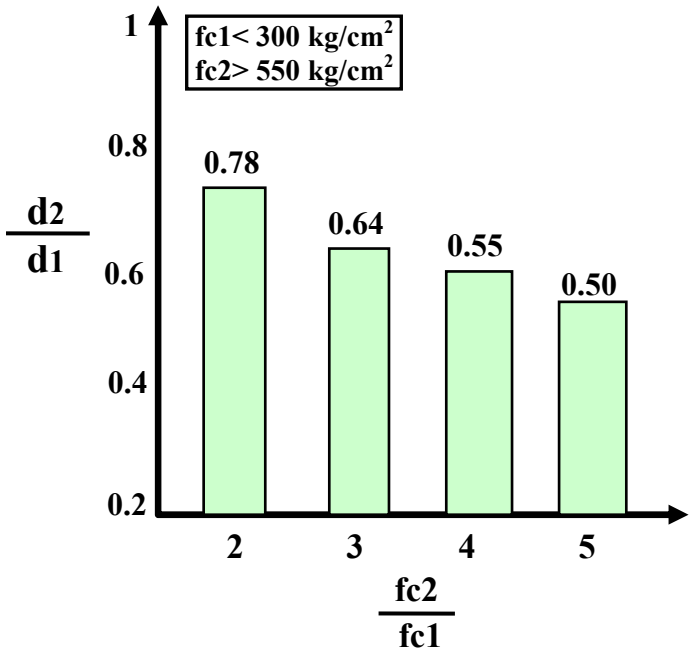
٤- أيضاً تتحقق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات وذلك بزيادة بحر الكمرة عند ثبات الحمل المؤثر وثبات القطاع الخرسانى. فقد وجد أنه يمكن زيادة بحر الكمرة إلى ١,٨ مرة عندما تزيد مقاومة الضغط للخرسانة ٤ مرات.

٥- شكل (٣-١٢) يوضح تحقيق الجدوى الفنية من استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى الكمرات من خلال زيادة السعة التحميلية للكمرة عند ثبات القطاع وزيادة نسبة حديد التسليح. فنجد أنه بزيادة مقاومة الضغط للخرسانة أربع مرات فإن السعة التحميلية لها تتضاعف ٣,٢٤ مرة.

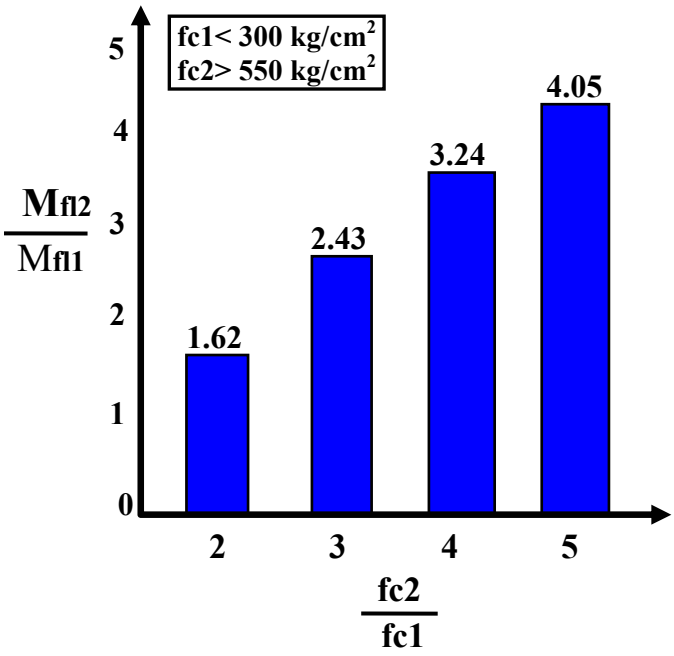
٦- يمكن إجراء تخفيض جزئي لكلٍ من عرض وعمق القطاع فى آن واحد كما هو مبين بشكل (٣-١٣) وذلك حتى يتم إسيفاء شروط التشغيل المختلفة.



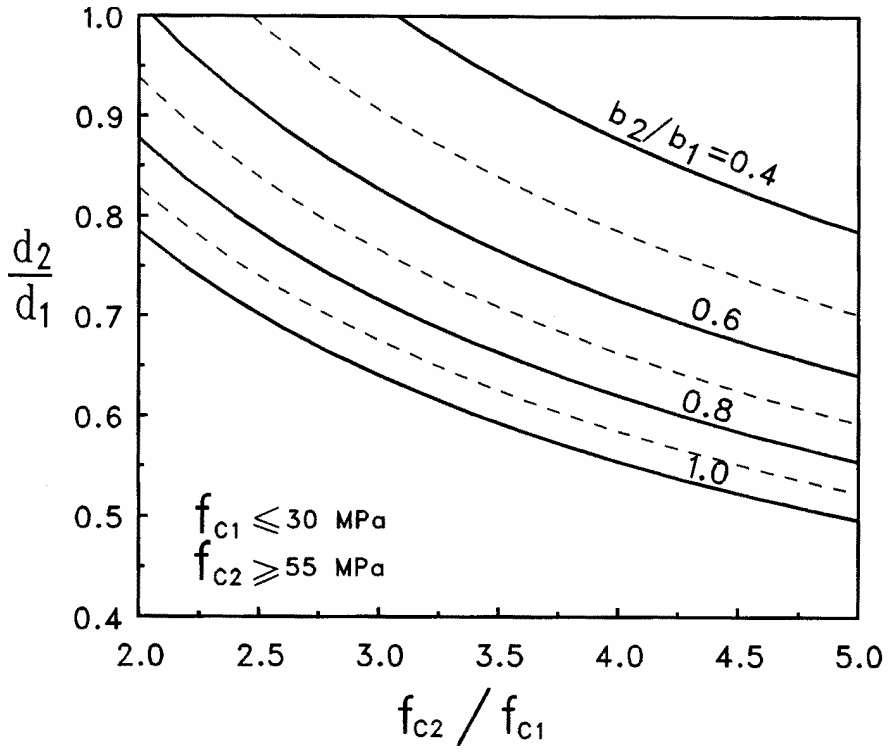
شكل (٣-١٠) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على نسبة الحديد الرئيسي فى الكمرات.



شكل (٣-١١) تأثير الخرسانة عالية المقاومة فى تقليل عمق القطاع فى الكمرات.



شكل (٣-١٢) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على السعة التحميلية للكمرات.



شكل (٣-١٣) تأثير الخرسانة عالية المقاومة على كلٍ من عرض وعمق القطاع فى الكمرات.

٣-٥-٤ المميزات العامة للخرسانة عالية المقاومة:

١- مقاومة الضغط فيها من ٦٠٠ إلى ١٤٠٠ كج/سم^{٢} (٥-٧ مرات مقاومة الخرسانة التقليدية).

٢- معاير المرونة يساوى تقريبا مرتين إلى مرتين ونصف معاير المرونة للخرسانة التقليدية مما يساعد فى تقليل الترخيم Deflection والتشكل Deformation.

٣- تمتاز بمتانة عالية Durability ومقاومة للاحتكاك ومقاومة للكيماويات.

٤- الفوائد الناتجة منها (مثل تقليل القطاعات وزيادة الأبحر وتقليل الوزن) أكثر من الزيادة فى تكاليف إنتاجها.

٥- تعطى مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن - وبالنسبة لوحدة الحجوم - وبالنسبة لوحدة الوزن Strength / unit weight - Strength / unit volume – Strength / unit Cost

ويمكن توضـيح النقطة السابقة كما يلي:

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الثمن

خرسانة ذات مقاومة ٢٠٠ كج/سم^{٢} تتكلف مثلاً ٢٠٠ جنيه/م^{٣} يعنى ١,٠ كج/سم^{٢}/جنيه.
بينما خرسانة ذات مقاومة ٦٠٠ كج/سم^{٢} تتكلف ٣٠٠ جنيه/م^{٣} أى ٢,٠ كج/سم^{٢}/جنيه.

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الحجوم

قاعدة عمود من خرسانة مقاومتها ٢٠٠ كج/سم^{٢} يكون حجمها حوالى ٤م^{٣} يعنى ٥٠ كج/سم^{٢}/م^{٣}.
بينما قاعدة من خرسانة مقاومتها ٦٠٠ كج/سم^{٢} يكون حجمها حوالى ٢م^{٣} يعنى ٣٠٠ كج/سم^{٢}/م^{٣}.

- مقاومة عالية بالنسبة لوحدة الوزن

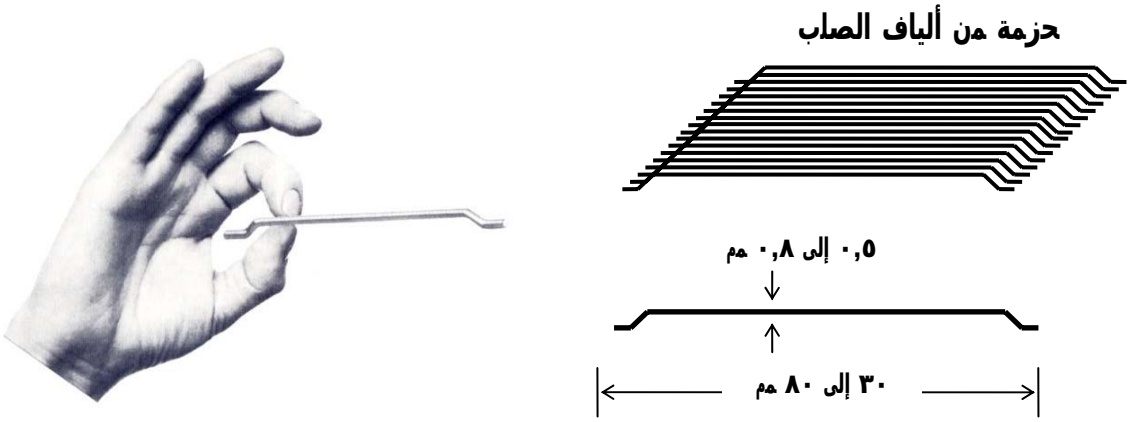
عمود من خرسانة ذات مقاومة ٢٠٠ كج/سم^{٢} يكون وزنة حوالى ٤ طن يعنى ٥٠ كج/سم^{٢}/طن.
بينما عمود من خرسانة مقاومتها ٦٠٠ كج/سم^{٢} يكون وزنة حوالى ٣ طن أي ٢٠٠ كج/سم^{٢}/طن.

ومن عيوب الخرسانة عالية المقاومة أنها أكثر قصافة Brittleness من الخرسانة التقليدية والانهيار بها مفاجئ حيث يكون الكسر فيها خلال الركام الكبير وليس حوله كما فى الخرسانة التقليدية ويمكن التغلب على هذه المشكلة بطرق عديدة منها استخدام الألياف مع الخرسانة. كذلك فإن استخدام الخرسانة عالية المقاومة يتطلب درجة عالية من ضبط الجودة والتحكم فيها.

٣-٦ الخرسانة الليفية Fiber Concrete

وهى الخرسانة المصنوعة من الأسمنت والركام و المحتوية على ألياف غير مستمرة و موزعة توزيعاً عشوائياً فى جميع الاتجاهات خلال الكتلة الخرسانية وتنقسم الألياف إلى قسمين رئيسيين من حيث النوع:

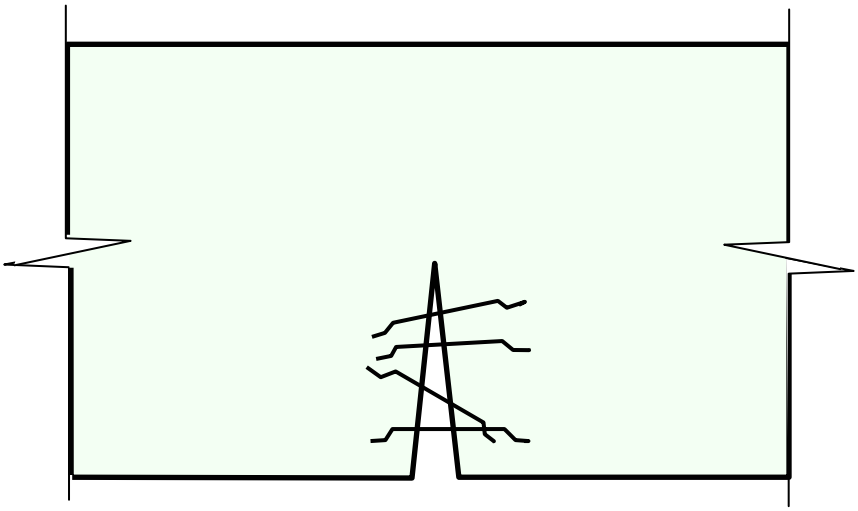
- ألياف الصلب وهى قطع من الصلب بطول ٣ إلى ٨سم وقطر من ٠,٥ إلى ٠,٨ مم كما بالشكل (٣-١٤).
- والألياف الصناعية مثل ألياف البولى بروبلين والبوليستر والبوليثيلين والأكريلك وتأخذ نفس شكل ألياف الصلب ولكنها مصنعة من مواد صناعية.



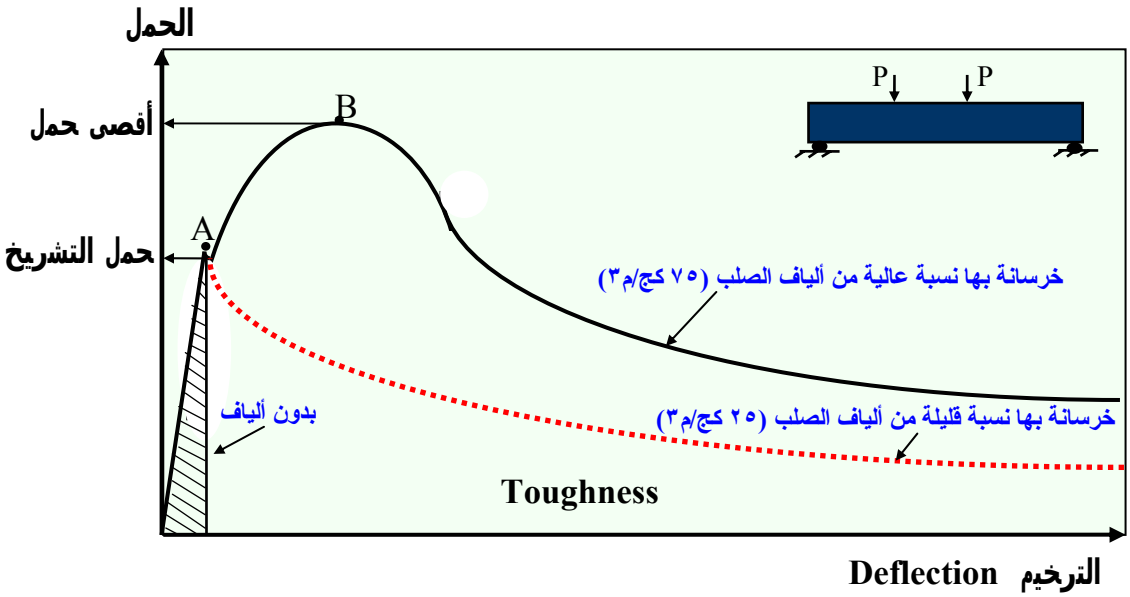
شكل (٣-١٤) ألياف صلب غير مستقيمة الأطراف.

والألياف لها القدرة على تحسين مقاومة الخرسانة فى القص والشد والانحناء والصدم والانكماش. كما أنها تعمل على تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها كما يتضح ذلك من الرسم الكروكى بشكل (٣-١٥)، ولكن الألياف لا تؤثر بدرجة كبيرة على مقاومة الضغط. وأهم وظيفة للألياف أنها تزيد من قيمة معاير المتانة للمادة زيادة كبيرة جداً. شكل (٣-١٦) يوضح منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية ومدى زيادة المتانة Toughness فى الخرسانة الليفية. وبالتالى فهي تحول ميكانيكية الكسر فى الخرسانة من كسر قصف مفاجئ وخطر Dangerous Sudden Failure إلى كسر غير قصف وتدريجي Ductile Failure. شكل (٣-١٧) يوضح مقارنة بين كمرتين متشابهتين من الخرسانة المسلحة (بدون كانات) أحدهما بدون ألياف والأخرى تحتوى على ألياف. ويتضح التأثير الكبير والفعال للألياف فى مقاومة قوى القص وزيادة معاير المتانة Toughness. وتستخدم الخرسانة الليفية على نطاق واسع فى الطرق والمطارات والمنشآت العسكرية وقواعد الماكينات. كما تستخدم فى الأسقف القشرية ومناطق

الاتصال بين الكمرة والعمود فى الإطارات. وتستخدم الألياف أيضاً فى المواسير الخرسانية والوحدات سابقة الصب و فى العناصر الخرسانية المعرضة لقوى القص والصدم. وبالرغم من أن الألياف تزيد من مقاومة قوى الشد فى الانحناء إلا أن هذه الزيادة غير جديرة بالاعتبار وبالتالى فإنه ليس من الحكمة أن تستخدم الألياف كبديل كلى أو إستعواضى لأسياخ صلب التسليح.



شكل (٣-١٥) دور الألياف فى تقليل اتساع الشروخ وإعادة توزيعها .



شكل (٣-١٦) منحنى الحمل والتشكل للخرسانة الليفية.

شكل (٣-١٧) تأثير الألياف الفعال فى مقاومة قوى القص وزيادة المتانة.

٣-٧ الخرسانة ذاتية الدمك Self-Compacting Concrete

٣-٧-١ تعريف :

الخرسانة ذاتية الدمك هى الخرسانة التى لها درجة عالية من السيولة والإنسياب Deformability كما أن لها مقاومة عالية للإنفصال الحبيبى Stability ويمكن صبها بنجاح فى القطاعات الضيقة والمزدحمة بحديد التسليح Filling Capacity وذلك بدون الإستعانة بأى وسيلة دمك خارجية.

وتعتبر الخرسانة ذاتية الدمك نتاج التقدم التكنولوجي فى مجال إضافات الخرسانة حيث تعتبر كل من إضافات تحسين اللزوجة وإضافات تقليل ماء الخلط (الملدنات الفائقة) هما العنصرين الأساسيين اللازمين لإنتاج هذه الخرسانة. ويعتبر اليابانيون هم رواد صناعة هذه الخرسانة حيث قاموا فى السنوات العشر الأخيرة باستخدامها فى منشآت وتطبيقات عديدة ومفيدة. بعد ذلك تم إنتاج هذه الخرسانة فى العديد من الدول مثل تركيا وأمريكا. وفى مصر تم حديثاً إجراء بعض الأبحاث فى جامعة المنصورة لإنتاج الخرسانة ذاتية الدمك باستخدام المواد المحلية كما تم دراسة المتطلبات الخاصة للقابلية للتشغيل وكذلك الاختبارات الخاصة والضرورية لهذه الخرسانة. وبصفة عامة فلقد أظهرت نتائج الاختبارات إمكانية صناعة الخرسانة ذاتية الدمك بالمواد المحلية المتاحة فى مصر بدرجة نجاح عالية. والبحث رقم ٣٨ بقائمة المراجع يختص بهذا الموضوع.

٣-٧-٢ الخواص المطلوب تحقيقها فى الخرسانة ذاتية الدمك:

أولاً: درجة إنسياب وسيولة عالية High Deformability

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- زيادة سيولة العجينة --- باستخدام الملدنات الفائقة و/أو استخدام نسبة عالية من ماء الخلط.

٢- تقليل الاحتكاك الداخلي بين الحبيبات --- بتقليل نسبة الركام الكبير فى الخلطة و/أو استخدام نسبة من البودرة الناعمة المتدرجة.

ثانياً: درجة مقاومة عالية للإنفصال الحبيبى Good Stability

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- تقليل الانفصال بين المواد الصلبة فى الخلطة عن طريق --- تقليل المقاس الإعتبارى الأكبر للركام و/أو تقليل نسبة الركام و/أو استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

٢- تقليل النضح (الماء الحر) إلى أقل درجة ممكنة عن طريق --- استخدام نسبة أقل من ماء الخلط و/أو استخدام بودرة ذات مساحة سطحية عالية و/أو زيادة نسبة إضافات تحسين اللزوجة.

ثالثاً: لها قدرة عالية على الصب والملء فى القطاعات الضيقة أو المزدحمة بحديد التسليح وذلك تحت تأثير وزنها وبدون حدوث إنسداد أو توقف للخرسانة Blockage

ويتحقق ذلك بالآتي:

١- أن يكون لها مقاومة عالية للانفصال الحبيبي أثناء صب وتدفق الخرسانة عن طريق --- استخدام إضافات تحسين اللزوجة و/أو تقليل نسبة ماء الخلط.

٢- التوافق بين مقاس القطاعات والمسافة بين الأسياخ من ناحية ومقاس الركام الكبير ونسبته فى الخلطة من ناحية أخرى وذلك عن طريق --- تقليل المقاس الإعتبارى الأكبر للركام و/أو تقليل نسبة الركام فى الخلطة.

٣-٧-٣ مميزات الخرسانة ذاتية الدمك:

١- سهولة الصب فى القطاعات المزدحمة بحديد التسليح والقطاعات الضيقة.

٢- القدرة على صب كمية كبيرة من الخرسانة فى فترة زمنية قصيرة.

٣- تحتاج عمالة أقل.

٤- لا يوجد بها إنفصال حبيبى.

٥- لا تحتاج إلى إستخدام هزازات فى الموقع مما يؤدى إلى سهولة الصب والتغلب على مشكلة الضوضاء الناتجة عن الهزازات.

٦- لها شكل ومظهر أفضل كما أنها لا تحتاج إلى تسوية سطحها بعد صبها .

٧- لا تعطى فرصة للتدخل فى الموقع لإضافة ماء للخلطة نظراً لسيولتها.

٨- أكثر معمرية من الخرسانة التقليدية.

٣-٧-٤ الاختبارات المطلوبة والغرض منها:

وتجدر الإشارة أنة بالنسبة للخرسانة ذاتية الدمك فإن تحقيق متطلبات وخواص الخرسانة الطازجة يكون له الأولية إذا قورن بمتطلبات وخواص الخرسانة المتصلدة حيث تعتبر المرحلة الطازجة هنا هى الغاية المنشودة ومن ثمّ توجد إختبارات خاصة لقياس خواص المرحلة الطازجة من الخرسانة ذاتية الدمك وفيما يلى نبذة مختصرة وسريعة عن بعض هذه الإختبارات:

١- إختبار الإنسياب الحر Slump Flow

وذلك لقياس الإنسياب الحر فى حالة عدم وجود عوائق فى طريق الخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز مخروط الهبوط التقليدى الموضح فى الباب السابع من هذا الكتاب. ويلزم أن يكون قطر الإنسياب فى حدود من ٦٠ إلى ٧٠سم.

٢- إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test

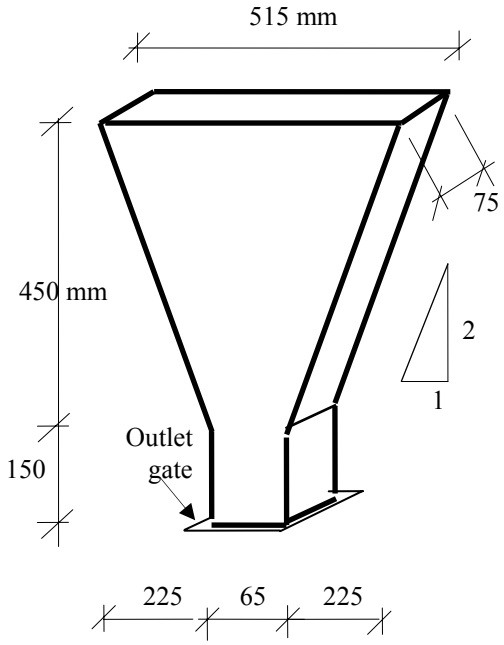
ويقيس قدرة الخرسانة على تغيير مسارها والإنتشار خلال منطقة ضيقة بدون حدوث إنسداد أو توقف. ويستحدم لذلك الجهاز الموضح بشكل (٣-١٨) حيث يتم قياس زمن مرور الخرسانة بالكامل فى القمع ، وهذا الزمن يجب أن لا يتجاوز عشر ثوان.

٣- إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity

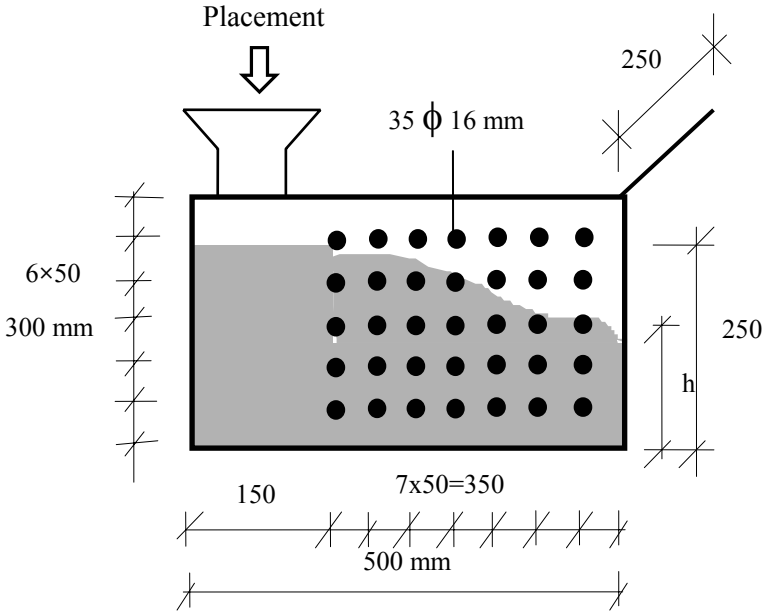
وذلك لقياس قدرة الخرسانة على الصب والتدفق فى وجود منطقة مزدحمة بحديد التسليح دون حدوث توقف أو إنسداد للخرسانة. ويستخدم فى ذلك جهاز خاص كما هو مبين بشكل (٣-١٩) حيث يتم قياس النسبة المئوية للخرسانة التى تملء الصندوق والتى ينبغى أن لاتقل عن ٨٠%.

٤- رصد الهبوط فى سطح الخرسانة Surface Settlement

وذلك لقياس الثبات فى الخرسانة بعد الصب وحتى حدوث التصلب. حيث ينبغى بقاء الركام معلق فى العجينة دون حدوث هبوط. وتستخدم أجهزة القياس الميكانيكية للتحكم فى رصد الحركة النسبية لسطح الخرسانة.



شكل (٣–١٨) الجهاز المستخدم فى إختبار إنسياب الخرسانة فى القمع V-Funnel Test



شكل (٣–١٩) الجهاز المستخدم فى إختبار القدرة على الصب والملء Filling Capacity Test

٣-٨ الخرسانة المقذوفة (خرسانة الرش) Shotcrete

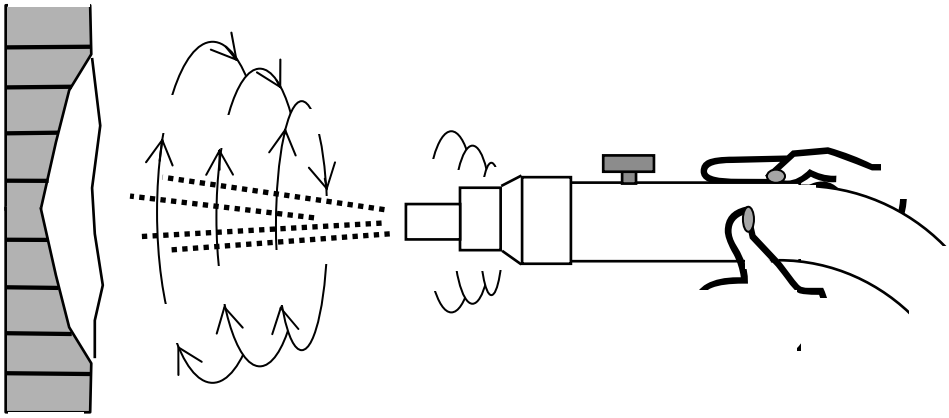
هى خرسانة (أو مونة) تقذف بضغط الهواء من فوهة القاذف بسرعة عالية إلى السطح المراد تغطيته بالخرسانة. وتستخدم غالبا فى أعمال الإصلاحات والترميم Repair وتبطين الأنفاق Tunnels وتبطين الترع وفى كثير من الأحوال التى يصعب فيها إستخدام الطرق التقليدية فى الصب فمثلاً عندما يكون مطلوب صب طبقات غير سميكة أو متغيرة السمك أو عندما يصعب الوصول إلى منطقة العمل أو عندما يكون إستخدام الشدات صعباً أو مكلفاً. كما تستخدم الخرسانة المقذوفة فى إصلاح الخرسانة المتداعية فى الكبارى والأهوسة والسدود والمنشآت المواجهة للمياه وكذلك مبانى الطوب المتآكلة. كما تستخدم فى تبطين الأفران بكافة أنواعها.

ويوجد نوعين رئيسيين لطريقة تنفيذ الخلطة ، أسلوب الخلط الجاف وأسلوب الخلط المبتل. ففى الطريقة الجافة يتم خلط الركام و الأسمنت وأى مكونات أخرى على الجاف أولاً وتدفع بإستخدام ضغط الهواء خلال القاذف ثم يضاف الماء عند فوهة القاذف ويدفع الجميع إلى السطح المراد صبه. أما فى الطريقة الرطبة فيتم خلط جميع المكونات بما فيها الماء خلطاً جيداً أولاً (ماعدا معجلات الشك إن وجدت) ويدفع الجميع بإستخدام ضغط الهواء خلال القاذف إلى السطح المراد قذفه. وفى جميع الأحوال يلزم إعداد السطح المقذوف عليه الخرسانة لضمان جودة ترابطها معه. ويمكن القول أن خواص وسلوك الخرسانة المقذوفة يعتمد كثيراً على صفات المعدات المستخدمة وعلى مهارة القائمين بها كما يعتمد على الظروف التى يتم بها الصب.

و تتميز خلطة الخرسانة المقذوفة بإحتوائها على محتوى أسمنت أعلى لتعويض نسبة الفقد منه عند الإرتداد من السطح. كذلك فإن ركامها يتميز بصغر المقاس حيث يفضل أن لايزيد عن ١٢ مم. كما أنها قد تحتوى على إضافات معينة (ماعدا المؤجلات Retarders) لتحسين بعض الخواص المرغوبة وغالباً فإن الخرسانة المقذوفة تحتوى على المعجلات Accelerators وذلك لتسريع عملية الشك للخرسانة المقذوفة. ويفضل أن تكون فوهة القاذف عمودية على السطح المقذوف ولا تتعدى زاوية ميل القاذف على السطح ٤٥ درجة وذلك لضمان التوزيع المنتظم للخرسانة ولتجنب حدوث تكور و دحرجة للخرسانة على السطح مما يؤدى إلى سطح متعرج غير منتظم. كما يفضل أن تكون المسافة بين فوهة القاذف والسطح فى حدود ٠,٦ إلى ١,٨ متر. شكل (٣-٢٠) ، شكل (٣-٢١) يوضحان إستخدام الخرسانة المقذوفة و التحكم فى القاذف.

ويعيب هذه الخرسانة تعرضها للإنكماش بقيمة كبيرة نتيجة لكثرة كمية الماء بها وكذلك زيادة محتوى الأسمنت مع نقص الركام الكبير. كما يعيب هذه الخرسانة أيضاً إحتمال عدم الإلتصاق والتماسك التام بمادة السطح الذى ترش فوقة وللتغلب على مشكلة الإنكماش يمكن إستخدام الألياف مع هذه الخرسانة والتى أثبتت نجاحاً كبيراً فى الوقت الحال.

شكل (٣-٢٠) صورة توضح إستخدام الخرسانة المقذوفة فى أحد الأنفاق.



حركة دورانية خفيفة فى فوهة الدفع لإنتاج خرسانة مقذوفة جيدة

شكل (٣-٢١) كروكى يوضح طريقة قذف الخرسانة والتحكم فى فوهة الدفع.

٣-٩ الخرسانة البوليمرية Polymer-Concrete

البوليمر أو الراتنج هو إسم لمادة عضوية تتكون من العديد من الجزيئات المتشابهة ذات الوزن الجزيئى المرتفع والجزئ الواحد من هذه الجزيئات يسمى مونومر.

أما الخرسانة الراتنجية فهى خرسانة خاصة يتم الحصول عليها بمعاملة الخرسانة العادية بمواد البوليمر التى تعمل كمواد لاحمة أومالئة للفراغات بين حبيبات الركام. وتمثل المواد البوليمرية حوالى ٦ إلى ١٥% من وزن الخرسانة ومن أمثلتها مواد أو مركبات البوليستر Polyester و الأيبوكسى Epoxy وقد تصل تكاليف خرسانة البوليمرز حوالى من ٢ - ٣ مرات تكاليف الخرسانة العادية وتمتاز بالآتى:

- مقاومة عالية للعوامل الخارجية مثل مقاومة التآكل ونفاذ الماء والمقاومة للكبريتات.
- مقاومة عالية جداً للإنكماش.
- مقاومة ضغط عالية قد تصل إلى ١٢٠٠ كج/سم^{٢}
- مقاومة شد تصل إلى ١٠٠ كج/سم^{٢}

وعموماً يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من الخرسانة المحتوية على راتنجات:

١- الخرسانة البلاستيكية	(PC)	Plastic Concrete
٢- الخرسانة البوليمرية الأسمنتية	(PCC)	Polymer Cement Concrete
٣- الخرسانةالأسمنتية المحقونة بالبوليمرات	(PIC)	Polymer Impregnated Concrete

٣-٩-١ الخرسانة البلاستيكية PC

وفيها تحل الراتنجات محل الأسمنت كمادة رابطه لجزيئات الركام. أى أنها عبارة عن ركام متماسك مع بعضه بواسطة مادة رابطة من البوليمرات. والخرسانة البلاستيكية لها خواص ميكانيكية عالية وزمن معالجتها قصير ولها إنكماش متناهى فى الصغر ومقاومة عالية للكيماويات وتتوقف الخواص على نوع الراتنج المستخدم وكميته فى الخلطة ومن أهم الأنواع المستخدمة:

- الأيبوكسى
- البولى إستر
- الفينول فورمالدهيد
- فورفورال أستيون

وهذه الخرسانة لها مقاومة تزيد بدرجة كبيرة عن الخرسانة الأسمنتية وتتوقف الزيادة على نوع الراتنج المستخدم وكميته فى الخلطة (أنظر شكل ٣-٢٢).

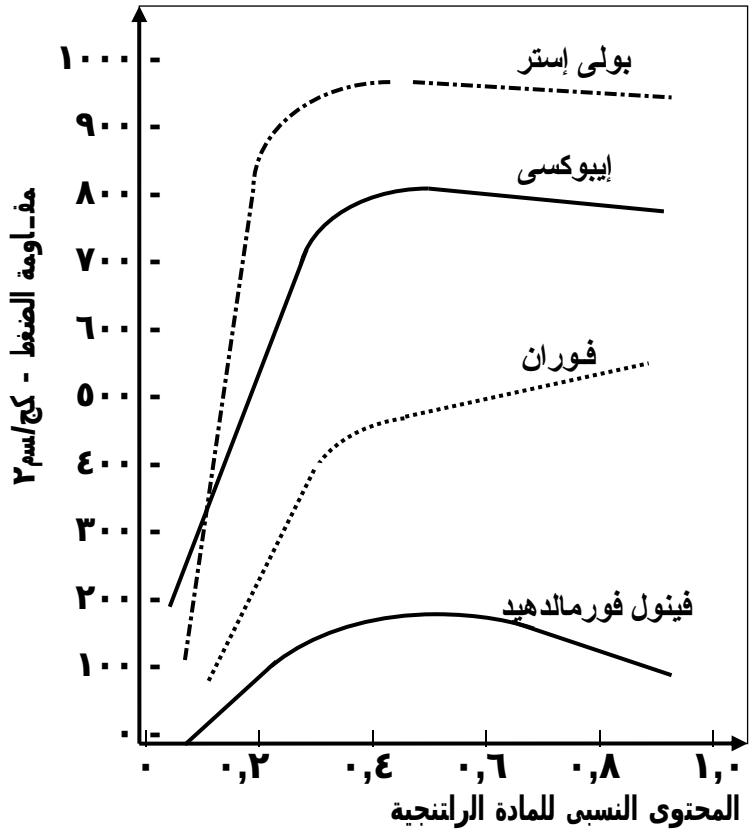
أهم تطبيقات الخرسانة البلاستيكية

١- طبقة حماية سطحية لأسطح الكبارى والمصانع وأماكن الخدمات والسلالم والخرسانة المسلحة و سابقة الإجهاد.

٢- ترميم الخرسانات التى حدث بها شروخ نتيجة الحرارة أو الإنكماش أو الأهتزازات.

٣- لصق الخرسانة الحديثة والقديمة أو الوحدات سابقة الصب.

٤- لصق الخرسانة على المعادن كطريقة للتقوية والتسليح الخارجى.



شكل (٣-٢٢) مقاومة الضغط لبعض الأنواع من الخرسانة البلاستيكية.

٣-٩-٢ الخرسانة البوليمرية الأسمنتية PCC

وهى التى تصنع بخلط الأسمنت والركام ويضاف اليها ماء الخلط المضاف إلية الراتنج. أى أنها خرسانة تقليدية مع إحلال جزء من ماء الخلط بواسطة مواد راتنجية. والراتنج المضاف يكون فى عبوتين: إحداهما تحتوى على المونومر والأخرى تحتوى على المصلد اللازم للتفاعل الكيميائى وإتمام عملية البلمرة (إتحاد الجزيئات) وتتم عملية البلمرة أثناء عملية التصلد للخرسانة. ومن ثم تتكون شبكة مستمرة من البوليمرات تملء أغلب فراغات الخرسانة. ويجب لذلك الحذر بأن لاتعطل عملية البلمرة طور الإماهة للأسمنت. ومن أهم المونومرات الشائعة الإستخدام كإضافة للخرسانة:

١- فينيل اسيتات	٢- الإكريلات
٣- فينيل كلوريد	٤- مستحلبات البيتومين
٥- المطاط	٦- الإيبوكسيات

وتجدر الإشارة إلى أن العلماء الروس قد توصلوا إلى خرسانة أسمنتية بوليمرية ذات خواص عالية وذلك بإدماج فورفريل الكحول "Furfryl Alcohol" وهيدروكلوريد الإيثيلين فى خليط الخرسانة مما نتج عنه خرسانة كثيفة ومعدومة الإنكماش تقريباً وذات مقاومة عالية للصدأ وذات مسامية منخفضه ومقاومة للإهتزازات. وعموما فإن النتائج التى تم الحصول عليها نتيجة إستخدام المونومرات كإضافات للخرسانة العادية أثناء الخلط قد أعطت تأثيرا محدودا على خواصها الميكانيكية وإن كان التأثير أكثر وضوحا على القوام والقابلية للتشغيل.

٣-٩-٣ الخرسانة الأسمنتية المحقونة بالبوليمرات PIC

وهى الخرسانة الأسمنتية المتصلدة والتى سبق صبها ويتم حقنها أو غلغلتها بواسطة مونومرات ذات لزوجة منخفضة ثم تتم البلمرة لهذه المونومرات بعد ذلك وهى داخل الخرسانة وتنقسم إلى ثلاثة أنواع:

أ - الخرسانة المغلغلة كليا :

وتستخدم لمقاومة درجات الحرارة العالية أو عند التعرض إلى المياه المالحة. وفيها يتم بدء تنشيط عملية البلمرة وذلك أما بالإشعاع Radiation أو بالحرارة Thermal method وأهم المونومرات التى تستخدم فى هذه الطريقة هى:

- المثيل ميثا كريلات	Methyl methacrylate
- الستيرين	Styrene
- الكلوروستيرين	Chlorostyrene

وقد أوضحت التجارب أن الخرسانة المغلغلة بالمثيل ميثاكريلات والتى تتم بلمرتها بالإشعاع لها مقاومة ضغط تصل إلى حوالى ٣٠٠ % عند درجة تشبع بالبولميرات مقدارها ٦,٦ %. وأوضحت النتائج أيضا أن هناك زيادة وتحسينات مناظرة لكل من مقاومة الشد ومعاير المرونة ومقاومة التجمد والذوبان ومقاومة البرى والتفاذية ومقاومة الكيماويات.

ب - الخرسانة المغلغلة جزئيا:

وقد تم عمل هذه الخرسانة كأسلوب لتبسيط عملية الغلغلة وتقليل التكاليف وذلك لإستيفاء التطبيقات التى تتطلب المتانة أكثر من القوة وأهم المواد المستخدمة فى هذه الطريقة هى البولى إسترسترين و الميثيل ميثاكريلات وتتأثر خواص الخرسانة الناتجة بدرجة كبيرة بعمق الغلغلة بالبوليمر وبالتالى مقدار التشبع به. وبصفة عامة فإن الخرسانة المغلغلة جزئيا تعطى نتائج عالية جداً وإن كانت أقل نسبيا من الخرسانة المغلغلة كليا.

ج - الخرسانة المغلغلة سطحيا:

وهى شبيهة بالخرسانةالمغلغلة جزئيا وإن كانت المونومرات المستخدمة فى هذه الطريقة لها لزوجة منخفضه وبالتالى فهى أكثر تطاير ولها معدلات بطيئة فى الإختراق داخل الخرسانة وهذه الطريقة من الغلغلة مناسبة لكبارى الطرق السريعة.

تطبيقات الخرسانة المغلغلة بالبوليمر

١- خرسانة محطات تنقيه المياه المالحة (مقاومة الحرارة + المواد الكيماوية)
٢- أرضيات الكبارى السابقة الإجهاد
٣- الدعامات الخرسانية لأسقف مناجم الفحم
٤- الأنفاق والمنشآت تحت الماء
٥- قواعد المضخات والمنشآت البحرية والخرسانات الخفيفة
٦- مواسير المجارى والضغط

٣-١٠ الخرسانة الخفيفة Lightweight Concrete

من أهم عيوب الخرسانة التقليدية (٢٢٠٠ إلى ٢٥٠٠ كج/م^3) كمادة إنشائية بالمقارنة مع الخشب والحديد أن الخرسانة التقليدية ثقيلة الوزن نسبياً حيث تكون نسبة الوزن الذاتى لأجزاء المبنى Own weight بالمقارنة مع الأحمال المؤثرة هى نسبة عالية فى جميع الأحوال. ولذلك تم التفكير فى إنتاج وإستخدام خرسانة خفيفة وزنها أقل من ٢٠٠٠ كج/م^3. ولذلك فقد أمكن تصنيع خرسانة إنشائية تزن ١٤٠٠ إلى ١٩٠٠ كج/م^3 بزيادة بسيطة فى التكاليف وكذلك إنتاج خرسانة نصف انشائية للبلوكات الداخلية تزن ٩٠٠ كج/م^3 وتستعمل بكفاءة كحوائط داخلية. وعموماً فإن الخرسانة الخفيفة هى تلك التى يقل وزنها عن ٢٠٠٠ كج/م^3. والغرض من إستخدامها هو تقليل وزن المنشأ وبالتالى تقليل تكاليف الأساسات وكذلك لأغراض العزل الحرارى والصوتى.

أنواع الخرسانة الخفيفة

يمكننا تخفيض وزن الخرسانة عن طريق واحد أو أكثر من الطرق الآتية:

١- إيجاد فراغات بين حبيبات الركام (خرسانة خالية من المواد الرفيعة Finless Concrete)

٢- إيجاد فراغات داخل الركام (خرسانة ذات ركام خفيف Lightweight Aggregate Concrete)

٣- إيجاد فراغات داخل العجينة الأسمنتية (الخرسانة المهواة أو الخلوية Cellular Concrete)

٣-١٠-١ خرسانة خالية من المواد الرفيعة Finless Concrete

تتكون من الأسمنت والركام الكبير فقط وأحيانا يستخدم فيها الهواء عن طريق إضافة مواد رغوية أو بإستعمال تدرجات خاصة من الركام. والركام الكبير يمكن أن يكون زلط أو أحجار مكسرة أو ركام خفيف. وينحصر تدرج الركام بين ١٠ مم ، ٢٠ مم ولا تتعدى نسبة المار من المنخل الصغير عن ٥% وهذا النوع من الخرسانة ذو كثافة تتراوح من ٣/٢ إلى ٤/٣ كثافة الخرسانة التقليدية المصنوعة من نفس الركام. وهذا النوع يحتاج إلى تصميم دقيق وخصوصاً بالنسبة لمحتوى الماء.

٣-١٠-٢ خرسانة الركام الخفيف Lightweight Aggregate Concrete

خرسانة الركام خفيف الوزن هى أكثر أنواع الخرسانات الخفيفة شيوعاً وإستخداماً إذ يمكن إستعمالها كخرسانة إنشائية. والركام المستخدم فى الخرسانة الإنشائية الخفيفة هو فى أغلب الأحوال ركام صناعى. وصناعة الركام تعتبر أحد أجزاء التصنيع للخرسانة الخفيفة ومن أمثلة الركام الخفيف:

- الطين الممدد (الليكا) - الفيرموكليت - الفوم (بوليسترين)

شكل (٣- ٢٣) يوضح بعض أنواع الركام خفيف الوزن.

الصفات الواجب توافرها فى الركام الخفيف

١- يجب أن تكون حبيبات الركام متجانسة من حيث التركيب والصفات.
٢- „ „ „ „ „ „ „ ذات وزن نوعى منخفض.
٣- „ „ „ „ „ „ „ ذات مقاومة مناسبة (عامل مؤثر على مقاومة الخرسانة).
٤- „ „ „ „ „ „ „ ذات قدرة على التماسك مع حبيبات الأسمنت.
٥- „ „ „ „ „ „ „ ذات مقاومة جيدة للعوامل الجوية.
٦- يجب أن تحتوى الحبيبات على أكبر عدد ممكن من الفراغات الداخلية الصغيرة المنفصلة وعلى أقل عدد ممكن من الفراغات الكبيرة المتصلة.

٣-١٠-٣ الخرسانة المسواة (ذات الخلايا) Cellular Concrete

وفى هذا النوع تتكون فقاعات من الغازات والهواء فى وسط الخرسانة وهى فى الحالة الطازجة ويظل التركيب مسامى بعد أن تشك الخرسانة. والطريقتين الرئيسيتين لإنتاج هذا النوع هما:

أ - انتاج غازات فى الخلطة بتفاعلات كيميائية

ب- إضافة مواد رغوية للخلطة.

ومن المواد الشائعة المولدة للغازات المسحوق الناعم من بودرة الألمونيوم أو بودرة الزنك (٠,٢% من وزن الأسمنت) وعند خلطها بالأسمنت تتكون فقاعات من الهيدروجين فتنتفخ الكتلة مكونة عند تصلدها مادة ذات تركيب خلوى. وتجدر الإشارةإلى أن هناك علاقة طردية بين وزن الخرسانة ومقاومتها للضغط.

شكل (٣-٢٣) بعض انواع الركام خفيف الوزن.

٣-١١ الخرسانة الثقيلة Heavy Weight Concrete

وهى خاصة بالوقاية من الإشعاع الذرى والنووى حيث تتناسب قدرة الخرسانة لإمتصاص هذه الإشعاعات مع وزنها أو كثافتها وبالتالى تكون حوائط وبلاطات الأرضيات والأسقف من الخرسانة الثقيلة. وتصنع الخرسانة الثقيلة من ركام من مواد ثقيلة من خامات الحديد أو خام الرصاص. وتجدر الإشارة أن خام الحديد يعطى خرسانة وزنها من ٣٠٠٠ إلى ٤٠٠٠ كج/م^{٣} ، وقد تستخدم قطع من الحديد كركام وتصل كثافة خرسانتة الى ٥٦٠٠ كج/م^{٣}. ومن الممكن أيضاً إستخدام النواتج الثانوية للفرن العالى مثل جلخ المحولات الأكسجينية وخردة سى لإنتاج خرسانة ذات كثافة حوالى ٢٨٠٠ كج/م^{٣}. ويستخدم فى بعض الأحيان ركام من صخر السربنتين (سليكات الماغنسيوم المماهة) وبصفة عامة فلابد لركام الخرسانة ثقيلة الوزن أن يوفى بمتطلبات الكثافة والتركيب وذلك للوقاية من الإشعاع . ويستخدم الأسمنت البورتلاندى العادى ولكن يفضل الأسمنت منخفض الحرارة فى حالة الخرسانة الكتلية ثقيلة الوزن كما لا يستخدم الأسمنت سريع التصلد. أيضاً لا تستخدم إضافات المعجلات أو إضافات الهواء المحبوس وإنما يمكن إستخدام الملدنات و المؤجلات.

ونظراً لأن الركام المكون من قطع الحديد يميل دائماً إلى الإنفصال عند خلطه أو صبه بالطرق التقليدية فإنه يفضل إستخدام الخرسانة الثقيلة سابقة الرص Prepacked Concrete والتى تعتبر أكثر مناسبة فى هذه الحالة. وتصنع الخرسانة سابقة الرص من دفع وضخ المونة خلال فراغات ركام نظيف ومرصوص و مدموك جيداً و مشبع بالماء. وعندما تضخ المونة خلال القوالب أو الفرم فتزيح ما بها من ماء وهواء وتملأ الفراغات وبذلك تنتج خرسانة ذات كثافة عالية بها نسبة عالية من الركام. ويميز هذه الخرسانة سهولة صبها فى بعض المناطق أو الأحوال التى يصعب فيها صب الخرسانة التقليدية.

٣-١٢ الخرسانة الكتلية Mass Concrete

وهى خرسانة ذات كتل كبيرة مثل خرسانة السدود والخزانات الأرضية أو أى خرسانة بحيث يكون حجمها من الكبر بحيث يتطلب ذلك أخذ الإحتياطات من تولد الحرارة الناتجة من إماهة الأسمنت وما يتبع ذلك من إنكماش وتشريخ للخرسانة. ويستخدم فى الخرسانة الكتلية ركام كبير قد يصل مقاسه حوالى ١٥ سم. ونظرا لوجود حرارة تفاعل عالية من الأسمنت فإنه ينبغى أخذ بعض الإحتياطات الضرورية مثل:

- إستخدام أسمنت من النوع منخفض الحرارة Low heat.
- إستخدام محتوى قليل من الأسمنت خلطة فقيرة Lean mix.
- إحلال نسبة من ١٠ إلى ٢٠% من الأسمنت بمادة بوزولانية مثل غبار السلسكا أو الرماد المتطاير.
- إستخدام الثلج المجروش بدلاً من جزء من ماء الخلط و تسمى هذه العملية بالتبريد السابق.
- وجود مواسير رفيعة من الصلب رقيق الجدران داخل الكتلة الخرسانية تمرخلالها دورات من الماء البارد لخفض الحرارة و تسمى هذه العملية بالتبريد اللاحق.
- الصب على طبقات قليلة الإرتفاع بحد أقصى واحد متر.
- العزل السطحى للخرسانة برقائق من البوليسترين أو اليوريثان وذلك بغرض تنظيم معدل هبوط الحرارة (وليس خفض الحرارة) بحيث يقل فرق الإجهاد الناتج من الهبوط السريع لدرجة الحرارة عند سطح الخرسانة وداخلها.

****

الباب الرابع

صناعة الخرسانة

Manufacture of Concrete

يمكن تقسيم المراحل التى تمر بها صناعة الخرسانة الى ثلاثة مراحل رئيسية هى:

١ - مرحلة ماقبل الصب (الإعداد) Preparation

أ ـ إختيـار المكونات وتصميم الخلطات　　ب ـ تشـوين المـواد
ج- إعـداد الفـرم والشـدات　　د ـ تحضير الكميات والعبوات

٢ - مرحلة الصب Fresh Concrete

أ ـ الخلط　　ب- النقـل　　ج- الصب
د- الدمك　　هـ ـ التشطيب

٣ - مرحلة ما بعد الصب Green Concrete

أ- المعالجة　　ب- إزالة الفرم والشدات　　ج- الترميم والبياض

٤-١ مرحلة الإعـداد (قبل الصب) Preparation

أ – إختيار المكونات

- يتم تحديد وإختيار النوع المناسب من كل مادة فمثلاً نوع الأسمنت المناسب للعملية (بورتلاندى عادى أو مقاوم للكبريتات أو منخفض الحرارة أو .....) وكذلك نوع الرمل المناسب (ناعم أو خشن أو ...) وليس المقصود بكلمة المناسب هنا الناحية الفنية فقط وإنما جميع النواحى الأخرى مثل الناحية الإقتصادية مثلاً.
- المقاس المناسب للركام الكبير طبقاً لنوعية ومقاس قطاعات الخرسانة التى ستُصب (قواعد أو أعمدة أو لبشة).
- إمكانية إستخدام بعض الإضافات أم لا وفى أى مرحلة من الصب.
- عمل تصميم للخلطة المطلوبة وتحديد الكميات اللازمة من كل مادة بالوزن والحجم.

ب- التشوين

- يراعى التأكد من توافر كل المواد اللازمة للصبة الخرسانية قبل البدء فى الصب.
- يتم تشوين المواد فى الأماكن المناسبة وبالترتيب المناسب والتى تسهل نقلها إلى مكان الصب.
- يكون التشوين لكل مادة بالطريقة المنصوص عليها فى المواصفات فمثلاً:

الأسمنت: يشون على أرضيات خشبية مهواه ويكون فى حماية من رطوبة الجو والأرض والمطر ويجب أن لا يستخدم فى أعمال الخرسانة المسلحة أى أسمنت بدأت تتكون به حبيبات متصلدة أو كتل أو مضى على تشوينه أكثر من ثلاثة شهور. وطبقاً للكود المصرى فيجوز إستخدام الأسمنت لغاية ستة أشهر بعد التأكد من سلامته.

الرمل: يكون على أرضيات صلبة نظيفة وبعيداً عن المطر أو أى مواد ملوثة.

الزلط: يغسل لإزالة الشوائب منه ويشون على أرضيات خرسانية أو خشبية.

الماء: عدم الإعتماد على ماء الصنبور خشية حدوث أى عطل وإنما ينبغى تخزين الماء مسبقا فى موقع الصب فى أوعية لا تصدأ.

الإضافات: تحفظ فى مكان أمين فى درجة حرارة الغرفة وبعيد عن الرطوبة وأشعة الشمس المباشرة وتراعى جميع التعليمات الخاصة بكل مادة على حدة.

ج- إعداد الفرم والشدات

- يتم إختيار نوع الشدات المناسب للعملية (شدات عادية - شدات منزلقة - شدات صلب).
- تكون الشدات قوية لتتحمل وزن الخرسانة والأحمال الحية أثناء الصب.
- يجب أن ترتكز قوائم الشدات على قواعد ثابتة.
- أن تكون القوالب محكمة لمنع تسرب اللبانى من الخرسانة.
- يجب تربيط الركائز بحيث لا تؤثر عليها الصدمات الأفقية الناتجة عن حركة العمال أو المعدات الصغيرة وكذلك ضغط الرياح و الإرتجاجات الناتجة عن المعدات المستخدمة فى العمل.
- تُرش أسطح الفرم الخشبية بالماء قبل الصب مباشرة لمنع إمتصاص الأخشاب لماء الخلط.
- يجب إعداد مسارات للعمل بحيث لا تؤثر حركتها على أبعاد وأشكال حديد التسليح.
- يفضل و ضع تخانات تفصل بين سطح القوالب و الأسياخ.
- يجب أن تنظف الفرم من الداخل بعناية قبل رص أسياخ التسليح وقبل صب الخرسانة مباشرة وذلك بإزالة الأتربة والفضلات ويمكن أن يتم ذلك بإستخدام الماء أو الهواء المضغوط.

د- تحضير الكميات والعبوات

الأسمنت: يفضل أن تحتوى عبوة الخرسانة على عدد صحيح من شكاير الأسمنت ولايسمح بمعايرة الأسمنت بالحجم وفى حالة إستعمال الأسمنت السائب يجب قياس الأسمنت بالوزن.

الركام: يقاس بالحجم بصناديق قياس ويجب ملء الصناديق بدون دمك. ويراعى الزيادة فى حجم الرمل نتيجة الرطوبة أو البلل وفى الأعمال الإنشائية الهامة يفضل قياس الركام بالوزن.

الماء: يقاس باللتر أو بالكيلوجرام ويجب أن يؤخذ فى الإعتبار كمية الماء المحتمل وجودها فى الركام.

الإضافات: تحدد فى أغلب الأحيان بالوزن كنسبة من الأسمنت.

٤-٢ مرحلة الخرسانة الطازجة (الصب) Fresh Concrete

أ- الخلط

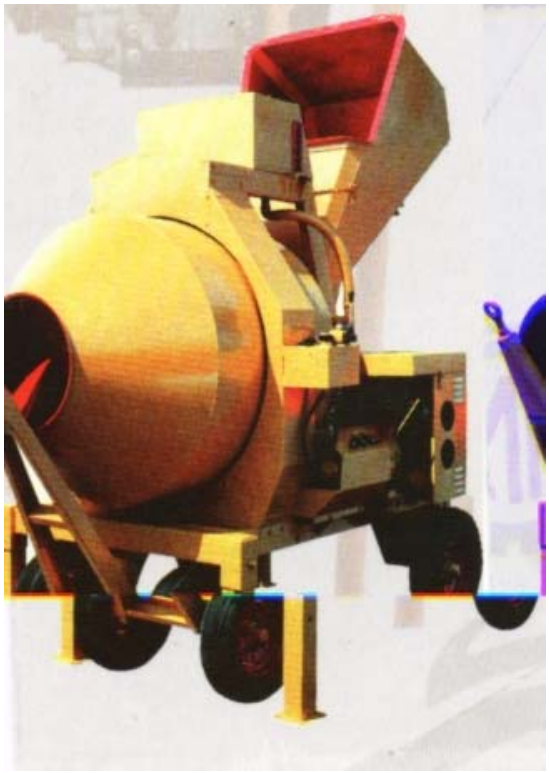
- نوع الخلط: يلزم خلط الخرسانة ميكانيكياً إما فى الموقع أو فى عربة خلط أو من خلال محطة خلط مركزية كما هو موضح بشكل (٤-١). أما شكل (٤-٢) فيوضح عربة سعة ١٠ متر مكعب لخلط ونقل الخرسانة ، بينما تظهر فى شكل (٤-٣) صورة لخلاطة موقع سعة ٠,٧٥ متر مكعب. و إذا دعت الضرورة القصوى لخلط الخرسانة يدويا فيتم ذلك بعد موافقة المهندس الإستشارى للمشروع وفى هذه الحالة يتم الخلط بتقليب المواد تقليباً جيداً بالنسب المطلوبة على طبلية مستوية صماء بواسطة الجاروف ذى الشداد ويلزم خلط الأسمنت مع الركام قبل وضع الماء ويقلب على ثلاث دفعات على الأقل ثم يضاف الماء تدريجيا بالقدر المطلوب للخلطة ويستمر التقليب والخلط حتى تتجانس الخلطة لوناً وقواما.

خلط فى الموقع		خلط أثناء النقل	خلط فى محطة مركزية بعيد عن الموقع
يدوى	ميكانيكى	ميكانيكى (عربة الخلط)	ميكانيكى

- زمن الخلط: يجب أن لا يقل زمن الخلط عن دقيقتين بعد وضع الأسمنت والركام أو لا يقل عن دقيقة واحدة بعد إضافة الماء. وذلك حتى يصبح الخليط متجانس فى اللون والقوام مع مراعاة عدم زيادة سرعة الخلاط عن السرعة المحددة له حتى لا يحدث إنفصال حبيبى كذلك لا يجب زيادة زمن الخلط عن ٥ دقائق لنفس السبب.

شكل (٤-١) محطة خلط مركزية لإنتاج الخرسانة.

شكل (٤-٢) عربة خلط خرسانة سعة ١٠ متر مكعب.



شكل (٤–٣) خلاطة موقع سعة ٠,٧٥ م٣.

شكل (٤–٤) طلمبة ضخ خرسانة – ٤٢ متر.

شكل (٤–٥) إستخدام عربات خلط ونقل الخرسانة و طلمبة الضخ فى صب أحد مراحل كوبرى ٦ أكتوبر.

ب- النقل و المناولة

- يلزم صب الخرسانة بعد تمام خلطها مباشرة مع مراعاة تجنب إنفصال مكوناتها على أن لاتزيد المدة مابين إضافة ماء الخلط وصب الخرسانة على ٣٠ دقيقة فى الجو العادى و ٢٠ دقيقة فى الجو الحار وأن يتم دمكها قبل مضى ٤٠ دقيقة فى الجو العادى و ٣٠ دقيقة فى الجو الحار أما إذا أستلزم الأمر زيادة الفترات السابقة فإنه يلزم إضافة مؤجلات للشك عند الخلط بعد موافقة المهندس الإستشارى للمشروع وذلك حتى لا تجف الخرسانة أو يحدث لها شكا إبتدائياً وخاصة فى الأماكن الحارة وحتى لا يحدث وصلات أو فواصل فى الخرسانة المصبوبة.
- يجب عدم حدوث أى إهتزازات للخرسانة أثناء النقل.
- ويكون النقل على حسب درجة المشروع وحجمه كما يلى:
  - ❑ نقل الخرسانة على سطح الأرض بإستخدام القواديس - عربات اليد - العربة القلابة.
  - ❑ نقل الخرسانة على مستويات عالية وذلك برفع القواديس بإستخدام الونش.
  - ❑ نقل الخرسانة على مستويات تحت الأرض وذلك بالجاذبية بإستخدام مجارى مائلة أو فى أنابيب.
  - ❑ حديثا يوجد مضخات للخرسانة Concrete Pump بمعدلات مختلفة تتناسب مع حجم المشروع. شكل (٤-٤) يوضح أحد المضخات ذات زراع بطول ٤٢ متر بينما يوضح شكل (٤-٥) إستخدام المضخات فى صب خرسانة أحد الكبارى.
  - ❑ يجوز تفريغ الخرسانة على طبلية صماء توطئة لنقلها يدويا مع مراعاة عدم تفريغ خلطة جديدة على الطبلية إلا بعد تمام نقل الخلطة السابقة.

ج- الصب

يجب مراعاة الإحتياطات الآتية أثناء عملية الصب:

- فى حالة صب الحوائط والأعمدة التى يتجاوز إرتفاعها ٢,٥متر فلا يجوز صبها بكامل الإرتفاع ويجب عمل شباك فى أحد جوانب القالب على إرتفاعات لاتزيد عن ٢,٥متر ويتم الصب من هذه الفتحات حيث يتم تقفيلها أولاً بأول مع مراعاة دمك الخرسانة ميكانيكيا.
- فى حالة صب بلاطة أو لبشة خرسانية بإرتفاع كبير يراعى أن تصب على طبقات سمكها يتراوح من ٤٠ إلى ٥٠ سم.
- يلزم مراعاة تحديد أماكن إيقاف الصب وسطح نهاية الصب (بلاطات وكمرات وأعمدة) مسبقاً قبل بدء الصب. وينبغى أن يكون إيقاف الصب فى الأماكن التى عندها عزم الإنحناء يساوى صفر أو بأقل قيمة ممكنة. ويراعى ترك سطح الخرسانة عند نهاية الصب مائلا خشنا فى البلاطات والكمرات وأفقيا خشنا فى الأعمدة. ولا يفضل وقف الصب عند المقاطع التى عندها قوى قص عالية.
- يجب فى كل منطقة من مناطق الصب البداية بصب الكمرات الرئيسية ثم الكمرات الثانوية ثم الأسقف.

- إذا زادت درجة الحرارة على ٣٦ درجة مئوية فى الظل يجب مراعاة الإحتياطات الآتية:

- ❑ تظليل تشوينات الركام الكبير والصغير ويمكن تبريد الركام الكبير بإستخدام رشاشات مياه.
- ❑ إذا كان الأسمنت سائباً فى صوامع فإنه يجب دهانها من الخارج بمادة عاكسة لأشعة الشمس أما إذا كان فى أكياس فترص تحت سقيفة مهواة.
- ❑ يبرد الماء قبل إستعماله فى خلط الخرسانة بإستخدام الثلج أو بأى وسيلة أخرى.
- ❑ دهان الخلاطات من الخارج بمواد عاكسة لأشعة الشمس أو تغطية الحلة بطبقة من الخيش مع رشها بالماء.
- ❑ رش القوالب بالمياه قبل الصب مباشرة.

- الصب على خرسانة قديمة : ينبغى أن يترك سطح الخرسانة القديمة خشن وغير مستوى وقبل الصب عليه ينظف من الأتربة ويزال الركام غير المتماسك كما ينظف حديد التسليح بفرشة سلك ثم يُندى سطح الخرسانة ويُصب عليه لبانى الأسمنت ويُفضل أن يُرش أو يُدهن سطح الخرسانة القديمة بمادة راتنجية تعمل على لحام الخرسانة القديمة مع الخرسانة الحديثة.

- صب الخرسانة الكتلية : ينبغى الصب على طبقات قليلة الإرتفاع بحد اقصى واحد متر مع إستخدام أسمنت منخفض الحرارة (لوهيت) وكذلك يمكن وضع مواسير داخل الخرسانة تمر خلالها دورات من الماء البارد لخفض درجة الحرارة.

- صب الخرسانة تحت الماء : يوجد طرق عديدة لصب الخرسانة تحت الماء منها:

١- طريقة القادوس (ترميو) Tremie

و فيها تُصب الخرسانة من خلال قادوس أو قمع متصل بماسورة قطرها من ١٠ إلى ١٥ سم تصل إلى القاع المطلوب صب الخرسانة عليه بحيث يراعى أن حافة الماسورة السفلية تكون غاطسة فى الخلطة الخرسانية على أن تُرفع الماسورة أثناء الصب بمعدل لايسمح بخروج الماسورة من الخلطة حتى لاتتسرب المياه بداخلها كما بشكل (٤-٦).

٢- طريقة ضخ الخرسانة Concrete Pumping

وهى تطوير لطريقة القادوس حيث تصب الخرسانة بالضخ عن طريق مواسير ممدودة إلى قاع مكان الصب.

٣- طريقة الدلو Bucket

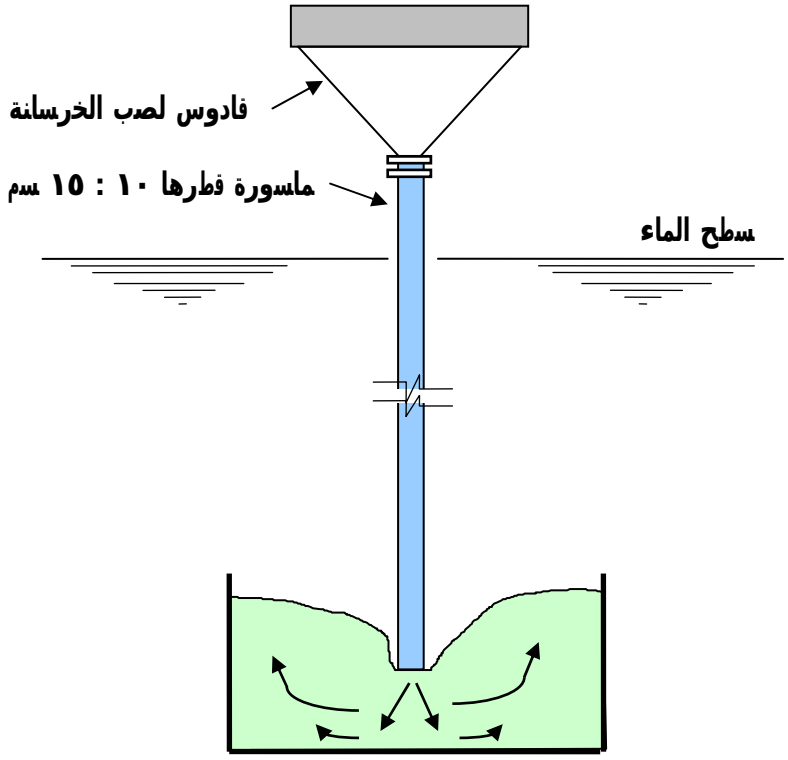
وهو عبارة عن وعاء على شكل متوازى مستطيلات أوإسطوانة مفتوحة من أعلى ومجهزة من أسفل ببوابة قابلة للفتح والغلق. يملء الدلو بالخرسانة ويغطى سطحه بطبقة من القماش المشمع ثم ينزل برفق فى الماء حتى مكان الصب ويفرغ ثم يرفع.

٤- طريقة الركام المحقون Grouted Aggregates

تعبأ الشدات بالركام ثم يحقن بالأسمنت اللبانى بواسطة أنابيب تمتد إلى قاع الفرم حيث يدفع الأسمنت الماء خارج الفرم ويحل محله مالئاً الفراغات بين حبيبات الركام.

٥- طريقة أكياس الخرسانة Sacked Concrete

وفيها يتم وضع خرسانة ذات قوام جاف (مفلفلة) فى أكياس (أجولة) من الجوت سعة كل منها واحد متر مكعب تقريبا وتربط الأكياس جيداً ثم ترص فى مكان الصب فى صفوف مترابطة كما فى حالة بناء الحوائط بحيث تكون الأكياس فى النهاية كتلة واحدة متماسكة متداخلة.



شكل (٤-٦) صب الخرسانة تحت الماء بطريقة القادوس.

د- الدمك Compaction

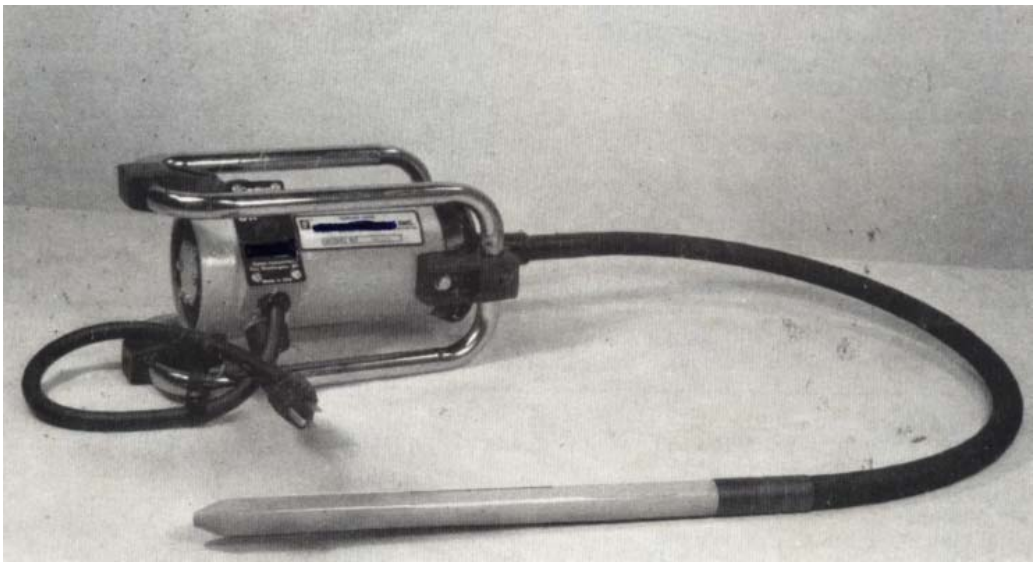
الغرض من عملية الدمك هو تقليل الفراغات والفجوات داخل الخرسانة والتأكد من تمام إنسياب الخلطة الخرسانية حول حديد التسليح وملء القالب تماماً إلى المنسوب المطلوب. وطرق الدمك هى:

دمك يدوى	دمك ميكانيكى		
قضيب الدمك Tamping Rod	هزازات داخلية Internal Vibrators	هزازات الفرم Formwork Vibrators	هزازات سطحية Surface Vibrators

ويوضح شكل (٤-٧) صورة هزاز ميكانيكى داخلى يعمل بالكهرباء ، بينما يوضح شكل (٤-٨) إستخدام الهزاز فى دمك الخرسانة. و يجوز الدمك يدوياً إذا لم ينص على إستعمال الوسائل الميكانيكية. وينبغى أن يقوم بالدمك شخص متخصص وله خبرة فى الدمك. يجب الإستمرار فى الدمك حتى ينتهى خروج فقاقيع الهواء أو تظهر طبقة رقيقة من عجينة الأسمنت على السطح النهائى للخرسانة ولا يسمح بالدمك بعد ذلك لأنه يسبب النضح Bleeding. كما ينبغى عدم لمس الهزاز الداخلى لحديد التسليح أثناء الدمك. ويراعى أن لا يتسبب الدمك بأى حال من الأحوال عن قلقلة الخرسانة السابق صبها أو زحزحة أسياخ التسليح من مكانها. شكلى (٤-٨) ، (٤-٩) يوضحان نوعين من الخرسانة أثناء الصب حيث نجد الخرسانة فى الصورة الأولى جافة نسبياً و تحتاج إلى إستخدام الهزاز الميكانيكى وقتاً كبيراً نسبياً. بينما نجد أن الخرسانة فى الصورة الثانية لها من السيولة والإنسيابية ما يجعلها ربما لاتحتاج إلى إستخدام الهزاز.

هـ- التشطيب Finishing

- معاملة السطح طبيعيا للحصول على سطح معمارى ناعم وذلك بإستخدام الواح ذات اسطح مستوية وملساء لعمل الفرم الخاصة وقد تكون من الأبلاكاج أو الإسبستوس أو الكونتر أو.....
- يمكن تجهيز الفرم بفواصل معينة للحصول على سطح يوحى أنه مبنى من الحجر.
- من الممكن عمل رسومات هندسية مثل الدوائر أو أوراق الشجر على طول ممرات الحدائق.
- يمكن أيضا تمشيط الخرسانة أو إظهار الركام الكبير بها ويتم ذلك غالبا فى المرحلة الخضراء من الخرسانة.



شكل (٤-٧) هزاز خرسانة بمحرك زمبة يعمل بالكهرباء .

شكل (٤-٨) صب خرسانة جافة نسبياً
تحتاج إستخدام الهزاز وقت أكبر.

شكل (٤-٩) صب خرسانة عالية السيولة
والإنسيابية لاتحتاج إستخدام الهزاز

٤-٣ مرحلة ما بعد الصب Green Concrete

أ- معالجة الخرسانة Curing

إن مقاومة الخرسانة للضغط وقوة إحتمالها ومقاومتها لنفاذ الماء وثبات حجمها يزداد بمرور الوقت (شكل٤-١٠) بشرط أن تكون الظروف مهيئة لإستمرار التفاعل الكيماوى بين الماء والأسمنت وذلك بحفظ درجة معينة ومناسبة من الرطوبة أو منع الماء من التبخر والمعالجة بإختصار تتم عن طريق:

١- إما منع تبخر ماء الخرسانة بتغطيتها أو قفل مسامها بعمل غشاء أو طبقة مانعة للتبخر.
٢- أو إضافة الماء بإستمرار للتعويض عن الماء الذى يتبخر.

ومن المواد المستعملة فى المعالجة:

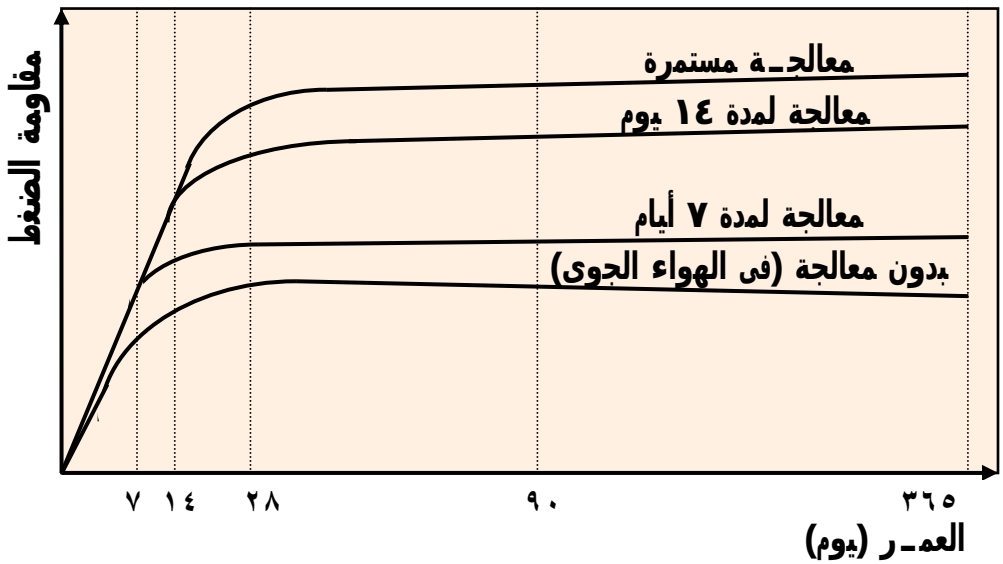
١- الماء.
٢- الخيش المرطب.
٣- الأغشية المانعة للتسرب مثل : لفائف البلاستيك والورق المانع لتسرب الماء.
٤- مركبات أو إضافات المعالجة والتى تعمل على سد مسام الخرسانة.
٥- مواد أخرى مثل الرمل الطبيعى والتبن والقش ونشارة الخشب والركام الناعم.

وطرق المعالجة كثيرة نذكر منها:

١- الغمر بالماء على شكل برك (فى الأسطح الأفقية والأرضيات).
٢- الرش بالماء - (حفظ السطح رطبا بين مواعيد الرش مع عدم السماح له بالجفاف).
٣- التغطية بالخيش الرطب.
٤- التغطية باللفائف المانعة لتسرب الماء.
٥- المعالجة بإستعمال المركبات الكيماوية (العازلة للرطوبة - السدودة).
٦- المعالجة بالبخار Steam Curing:

تحت ضغط عادى (ضغط الجوى) وتستغرق ١٠-١٦ ساعة .
تحت ضغط عالى وتستغرق ٧-٨ ساعات.

والمعالجة بالبخار تستخدم فى مصانع الخرسانة الجاهزة وهى عملية معقدة ومكلفة ولكنها تؤدى إلى السرعة فى عملية الإماهة والتصلد للإسراع من الإنتاج وتجنب مشاكل التخزين وتفيد فى عمل خلطات ذات محتوى ماء قليل فتزيد المقاومة وتقل نسبة الإنكماش وتكون ذات مقاومة أعلى للكبريتات.



شكل (٤-١٠) تأثير المعالجة على مقاومة الخرسانة.

ب- إزالة الفرم والشدات

إن المدة الواجب إنقضاؤها بين صب الخرسانة وفك الشدات تتوقف على درجة الحرارة وطول البحر ونوع الأسمنت المستخدم وأسلوب المعالجة والحمل الذى سيتعرض له المنشأ بعد الفك. ويشترط أن لا ينتج عن الفك حدوث أى ترخيم أو شروخ أو تشوهات غير مسموح بها. ويجب مراعاة أن لا تتعرض الخرسانة للإهتزازات أو الصدمات أثناء الفك. وفى حالة إستعمال أسمنت بورتلاندى عادى فيمكن إزالة الفرم والشدات الخشبية بعد مدة لاتقل عن القيم الآتية:

- الجوانب والأعمدة المعرضة لقوى ضغط محورى فقط يمكن فكها بعد ٢٤ ساعة.
- الكمرات والبلاطات بعد مدة = ٢ل + ٢ يوم

حيث ل = طول بحر الكمرة أو البحر الأصغر للبلاطة بالمتر. بحيث لاتقل المدة عن أسبوع.

- الكوابيل بعد مدة = ٤ل + ٢ يوم

حيث ل = بروز الكابولى بالمتر. بحيث لاتقل المدة عن أسبوع.

- عندما تكون الفرم والركائز حاملة لأحمال إضافية كما فى حالة الطابق الذى يحمل وزن الطابق التالى حديث الصب فلا يجوز فك القوائم إلا بعد إنقضاء ٢٨ يوماً مع إتخاذ كافة الإحتياطات التى تضمن إرتكاز القوائم على أرضية تتحمل الأثقال عليها بأمان وبعد التأكد من أن مقاومة الخرسانة بعد ٢٨ يوم قد أوفت بإشتراطات المشروع.

❑ فى حالة إستعمال أسمنت بورتلاندى غير عادى أو فى الحالات التى تنخفض فيها درجات الحرارة عن ١٥ درجة مئوية فيجب الحذر وتأجيل فك الفرم والشدات الخشبية مدة مناسبة بالإضافة إلى المدد المشار إليها عاليه.

ج- الترميـم والبيـاض

- يشتمل الترميم على:

إزالة الزوائد - ملء الفجوات وأماكن التعشيش - تنظيف السطح الخارجى للخرسانة.

- طريقة ملء الفجوات:

يتم تنظيف أماكن العيوب وإزالة المونة والركام الضعيف
تُبلل الفجوات بالماء ثم تُفرش بمونة الأسمنت والرمل بنسبة ١:١ بالوزن
تُصب مونة الترميم والمكونة من أسمنت ورمل بنسبة ٣:١ بالوزن بحيث تكون بارزة قليلا عن سطح الخرسانة وتُترك مدة ٢ ساعة تقريبا ثم يسوى السطح على السطح المحيط به.
(يفضل إستخدام مونة الجراوت مباشرة فى مثل هذه الأعمال).

- أما معالجة السطح الخارجى فتتم بطرق عديدة منها:

١- تنظيف السطح الخارجى بإستخدام الخيش والمونة الغنية بالأسمنت وذلك لملء الثقوب الصغيرة و إعطاء سطح الخرسانة لون متجانس.
٢- الغسيل بالأسمنت.
٣- الطرطشة: وذلك برش طبقة من مونة الأسمنت والرمل الناعم على سطح الخرسانة.
٤- البياض بالمحارة: وذلك بعمل طبقة من مونة الأسمنت والرمل بسمك ٢:١ سم ثم تمشط أو تنعم.

****

الباب الخامس

تصميم الخلطات الخرسانية

Concrete Mix Design

٥-١ مقدمة

تصميم الخلطات الخرسانية يعنى تحديد القيم النسبية لمكوناتها Proportioning بما يتفق مع المتطلبات المرغوبة لعمل معين. ويكون ذلك بإستخدام نسب ثُبتت فاعليتها من الخبرة وتسمى بالنسبة الوضعية Empirical Proportioning وقد يكون بطرق حسابية مبنية على أساس فنى تتضمن خواص المواد المستخدمة والخواص المطلوبة فى الخرسانة المتصلدة (مثل مدى المقاومة للأحمال أو المقاومة للبرى) والإشتراطات التى تتطلبها خطوات صناعة الخرسانة مثل السهولة المناسبة للصب Placing والتسوية النهائية (التشطيب Finishing) لسطح الخرسانة. وذلك مع مراعاة التكاليف الإقتصادية حسب نوع العمل الإنشائى المطلوب. وهذه الطرق الحسابية تهدف الى إستخدام المواد الموجودة Available Materials لنحصل منها على خرسانة ذات خواص مطلوبة فى الحالتين الطازجة والمتصلدة وذلك بأقل التكاليف Required Qualities at Minimum Cost ويمكن إعتبار أن مقاومة الخرسانة للضغط تبين مدى جودة Quality الخرسانة المتصلدة كما تعبر قيمة الهبوط Slump عن مدى جودة الخرسانة الطازجة.

ويعتبر تحديد نسب الخلطة الخرسانية من أهم العوامل التى تؤثر على جودة الخرسانة وعلى إقتصاديات المشروع. فمن الممكن الحصول على خرسانات متباينة فى جودتها وثمنها بالرغم أن جميعها تتكون من نفس المواد. ويعتمد الإقتصاد النسبى للخلطات الخرسانية على أثمان مكوناتها وعلى أجور العمال وتكاليف النقل لتلك المكونات. ويعتبر الأسمنت أحد المكونات الأساسية للخرسانة والذى تؤثر نسبة وجوده فى الخلطة تأثيراً كبيراً على تكاليفها نظراً لغلو ثمنه بالنسبة لباقى المكونات.

٥-٢ كيفية بيان نسب مكونات الخرسانة Expressing Proportions

❐ تُبَيَن مكونات الخرسانة من المواد الحبيبية Granular Materials وهى الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير عادة على هيئة نسب Ratios بالوزن أو بالحجم فمثلا عندما يقال خلطة ١ : ٢ : ٤ معناها:

الأسمنت	الرمل	الزلط
١	٢	٤

أى تحتوى على جزء من الأسمنت وجزئين من الرمل وأربعة أجزاء من الزلط. وتفضل أن تكون تلك النسب بالوزن لعدم إمكان التحديد الدقيق لكمية الأسمنت بالحجم وأيضا الركام نتيجة تغير الكمية التى يستوعبها حجم معين بتغيير مدى الدمك Compaction المستخدم. كما أن الركام الصغير قد يتغير حجمه بتأثير ظاهرة زيادة الحجم Bulking بالرطوبة.

- وقد تُبَيَن المواد الحبيبية كنسبة بين الأسمنت والركام الخليط Cement/Agrregates Ratio فمثلاً خلطة ١: ٦ أى جزء واحد أسمنت وستة أجزاء ركام بالوزن وتبين هذه النسبة مدى غنى او إفتقار الخرسانة Rich or Lean Mix فالخلطة ١ : ٤ تعتبر خلطة غنية أما الخلطة ١ : ٨ فتعتبر خلطة فقيرة.

- وقد تُبَيَن نسب المواد الحبيبية بما يحوية المتر المكعب للخرسانة الطازجة من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير على أن يُبين الأسمنت بالوزن والركام بالحجم تسهيلاً لتحضير الكميات عند الخلط فمثلا بخلطة .

أسمنت	رمل	زلط
٣٠٠ كيلوجرام	٠,٤ متر مكعب	٠,٨ متر مكعب

ومجموع هذة الكميات يعطى تقريبا بعد خلطها بالماء حوالى متر مكعب من الخرسانة الطازجة

- كما يمكن ان يُعبَر عن الأسمنت بعدد الشكاير للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة وهذا العدد يسمى معامل الأسمنت Cement Factor فمثلاً خلطة يحتوى المتر المكعب منها على ٦ شكاير أسمنت (الشيكارة وزنها ٥٠ كيلو جرام) وخلطة أخرى غنية يحتوى المتر المكعب منها على ٨ شكاير أو خلطة فقيرة يحتوى المتر المكعب منها على ٤ شكاير:

أسمنت	رمل	زلط
٦ شكاير	٠,٤م^3	٠,٨ م^3

- وتُبَيَن كمية الماء اللازمة للخلطة على هيئة نسبة من الأسمنت بالوزن فمثلا خلطة بها نسبة الماء الى الأسمنت = ٠,٥ بالوزن ، فاذا علم وزن الأسمنت فى المتر المكعب للخرسانة الطازجة أمكن تعيين وزن الماء اللازم له لإجراء الخلط وبالتالى يمكن تعيين حجم ذلك الماء باللتر. وأحياناً قد تُبَيَن كمية ماء الخلط اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة مباشرة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	زلط	ماء
٣٠٠ كج	٠,٤م^3	٠,٨ م^3	١٥٠ لتر

أى أن المتر المكعب من الخرسانة الطازجة لهذه الخلطة يلزم له ٣٠٠ كج أسمنت (٦ شكاير) و ١٥٠ لتر ماء. وتحسب الكميات المطلوبة من المواد لأى خلطة تبعا لعدد الأمتار المكعبة الكلية من الخرسانة الطازجة.

❐ وتُبَيَن كمية الإضافات -إن وجدت- على أساس أنها نسبة مئوية من وزن الأسمنت المستخدم بالخلطة فمثلا خلطة:

أسمنت	رمل	زلط	ماء
٣٠٠ كج	٠,٤ م^3	٠,٨ م^3	١٥٠ لتر

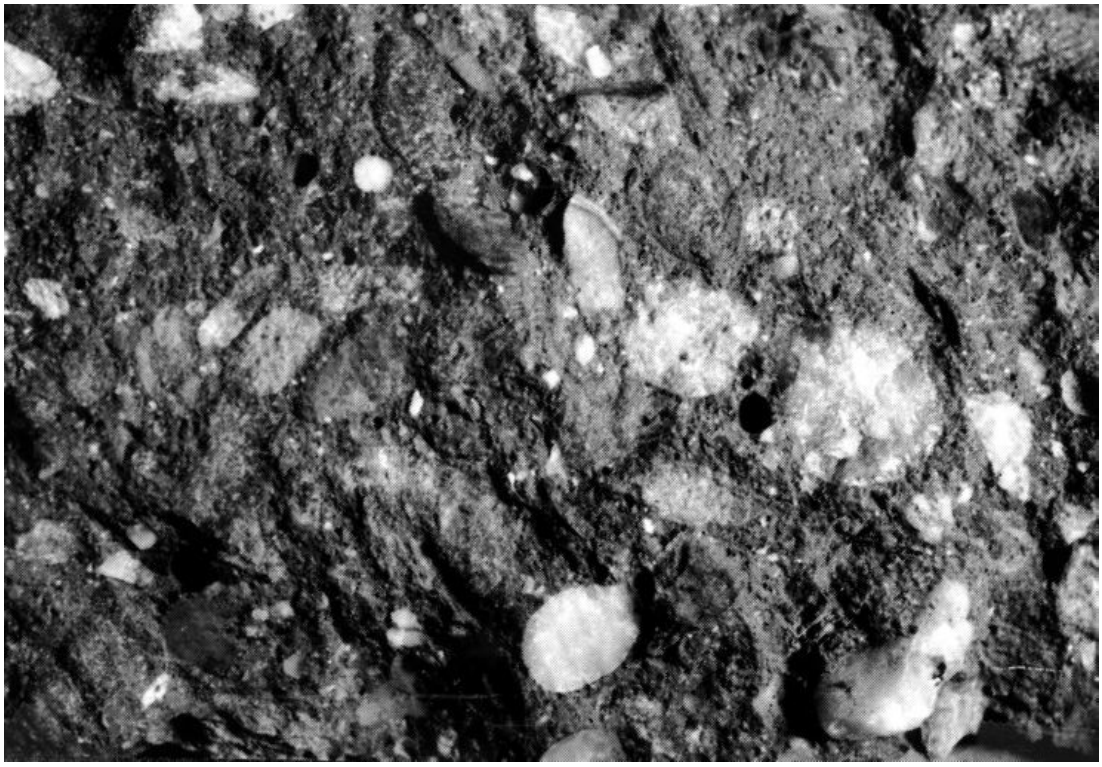
بها ٢ % ملدنات تعنى أن وزن الملدنات المستخدم = ٣٠٠ × ٠,٠٢ = ٦ كيلو جرام للمتر المكعب من الخرسانة الطازجة.

٥-٣ العلاقة بين الركام والعجينة الأسمنتية Aggregate-Paste Relationship

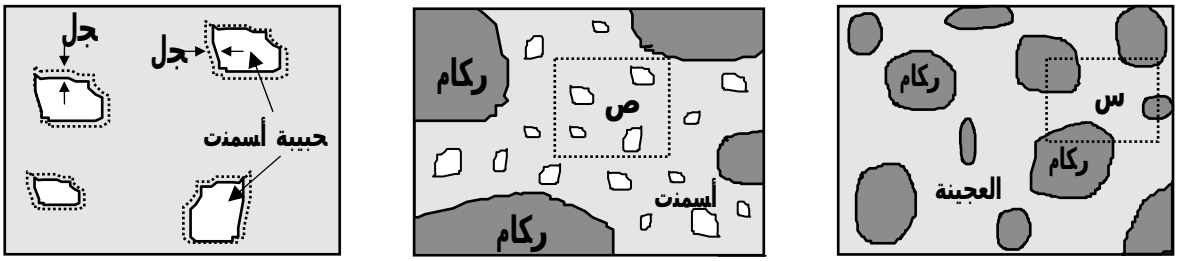
تتركب الخرسانة من عجينة أسمنتية (نشطة) وركام (خامل) وتعتمد مقاومة الخرسانة على مقاومة العجينة حيث أن مقاومة الركام كبيرة جداً بالنسبة لمقاومة العجينة. ولذلك فإن إنهيار الخرسانة التقليدية يكون دائماً فى العجينة ويمر الشرخ حول الركام. فإذا أمكننا إنتاج عجينة ذات مقاومة عالية جداً تقترب من مقاومة الركام فإننا نحصل على خرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete والتى يكون الإنهيار فيها مفاجىء حيث يمر الشرخ بالركام (وليس حوله) ويشطره كما فى شكل (٥-١).

ومن الجدير بالذكر أن تشغيلية الخرسانة تنتج من تأثير تشحيم العجينة للركام وتتأثر بمقدار سيولة العجينة. كما تعتمد نفاذية الخرسانة للسوائل على وجود واستمرار العجينة الأسمنتية. وبالإضافة الى ذلك فإن إنكماش الكتلة الخرسانية الدائم يكون ناتج من العجينة الأسمنتية وليس الركام.

والعجينة الأسمنتية تكون عبارة عن مُعلق Suspension للأسمنت فى الماء (شكل ٥-٢). وكلما خفت درجة تركيز المعلق كلما زادت المسافة بين حبيبات الأسمنت وكلما قلت بالتبعية بنية العجينة. وهذا يوضح أن مقاومة الضغط للخرسانة دالة عكسية مع نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س). وعندما تبدأ عملية الإماهة للأسمنت فيتكون الجل من الماء ومن مادة سطح حبيبات الأسمنت والذى قد يصل حجمه الى ضعف حجم الأسمنت الناتج منه. وهكذا مع إستمرار الإماهة يستمر تكون الجل حول كل حبيبة حتى يتصل الجل ببعضه مكوناً بنية العجينة.



شكل (٥-١) الكسر فى الخرسانة عالية المقاومة يمر خلال الركام وليس حوله.



شكل (٥-٢) علاقة العجينة الأسمنتية بالركام.

٥-٤ طرق تصميم الخلطات الخرسانية Mix Design Methods

أولاً : الطريقة الوضعية Empirical Method

تحدد هذه الطريقة نسباً لمكونات الخرسانة نتيجة الخبرة Experience السابقة للإستعمال بنجاح. وقد أثبتت هذه الطريقة ملائمتها وصلاحيتها للعمليات الصغيرة Small Jobs نظراً لسهولتها حيث تعطى المواد الصلبة (الأسمنت ، الرمل ، الزلط) على هيئة نسب بالوزن أو الحجم وقد تحدد كمية الماء اللازم أو تترك لمراعاتها أثناء الخلط بحيث نحصل على خلطة لدنة Plastic سهلة التشغيل Workable. ونسب مكونات الخرسانة بالوزن المستخدمة عادة فى المنشآت طبقا لنوع الخرسانة أو طبقا لمقاومة الخرسانة للضغط هى كما يلى :

	الأسمنت	الرمل	الزلط	أى	الأسمنت	الركام
خلطة غنية ذات مقاومة عالية	١	١	٢		١	٣
خلطة متوسطة	١	٢	٤		١	٦
خلطة فقيرة ذات مقاومة منخفضة	١	٣	٥		١	٨

وذلك على أساس أن الركام مناسب والماء أقل ما يمكن لجعل الخلطة ذات قوام Consistency مناسب لتكون لدنة. والنسب الوضعية المستخدمة فى جمهورية مصر العربية هى:

أسمنت	رمل	زلط
س كج	٠,٤ م^3	٠,٨ م^3

مع كمية الماء المناسبة والمعقولة وتتراوح قيمة الماء كنسبة من الأسمنت (م/س) من ٠,٤ إلى ٠,٧ بالوزن ويحدد كميتها طبيعة العمل. أما كمية الأسمنت "س" فيحددها نوع العمل والخلطة اللازمة له هل هى غنية أو فقيرة حيث تتراوح "س" من ٢٠٠ إلى ٤٠٠ كيلوجرام أى من ٤ إلى ٨ شكاير للمتر المكعب من الخرسانة. ويحدد كمية الأسمنت وكمية الماء المهندس المسئول عن مواصفات العملية تبعا لطبيعتها .

❐ وعيوب هذه الطريقة تتلخص فى النقاط الآتية:

١- نسبة الماء / الأسمنت (م/س) غير محددة ومتروكة لظروف العمل.
٢- النسبة المذكورة لا تعطى متراً مكعبا فى جميع الحالات وقد يصل الحجم أحياناً إلى ١,٢ م^3.
٣- نسبة الرمل / الزلط شبه ثابتة وهى ١: ٢ مع ملاحظة إهمال نوع الركام وتدرجه والمقاس الإعتبارى الأكبر له وكذلك إهمال معاير النعومة للرمل.
٤- لا يمكن الحصول على بيانات صحيحة لخواص الخرسانة الناتجة وكذلك لا يمكن توقع قيمة دقيقة لمقاومة الضغط لهذه الخرسانة.

ثانياً : طريقة المحاولة Trial Method

تعتمد هذه الطريقة على معرفة نسبة م/س فى الخلطة الخرسانية ويلزم عمل إختبارات مقارنة بين المواد المختلفة والخلطات المتباينة. وتتطلب هذه الطريقة وجود عينات من الأسمنت والزلط والرمل كما يجب تحديد نسبة م/س وكذلك المقاومة المطلوبة.

❐ وفيما يلى ملخص لخطوات تصميم خلطة خرسانية بطريقة المحاولة:

- تؤخذ كمية من الأسمنت فى حدود ٢,٥ كج (٥% من وزن الشيكارة).
- تحدد نسبة (م/س) من الخبرة أو من المنحنيات البيانية أو من الجداول.
- يخلط الأسمنت والماء لتكوين عجينة الأسمنت المكونة من أ ، ب.
- تحضر كمية من الرمل والزلط ويفضل إستخدام الركام المشبع والسطح جاف كما يراعى ألا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر عن ١/٥ البعد الأصغر للمقطع وأن لا يزيد عن ٣/٤ المسافة بين أسياخ حديد التسليح (أيهما أصغر).
- يضاف تدريجيا كميات من الرمل والزلط وتخلط الخلطة جيداً ثم يحدد قوام الخرسانة إلى أن تصل إلى الخلطة التى تعطى القوام المطلوب.
- توزن بعد ذلك الكميات المتبقية ومنها تحسب الأوزان المستعملة.
- تحسب الكميات بالوزن والحجم المطلوبة لعمل خلطة الخرسانة لموقع العمل .

ثالثاً: طريقة الحجم المطلق Absolute Volume Method

تفترض هذه الطريقة أن الحجم المطلق للخرسانة هو مجموع الحجوم المطلقة للمواد المكونة للخرسانة Concrete Ingredients أى الحجم المطلق للأسمنت والرمل والزلط والماء كما يلى:

$$\text{Absolute Volume} = \frac{C}{G_c} + \frac{S}{G_s} + \frac{G}{G_g} + \frac{W}{1.0} = 1000 \text{ Liters}$$

حيث :

C = وزن الأسمنت بالكيلوجرام اللازم للمتر المكعب من الخرسانة .
S = وزن الرمل ،، ،، ،، ،، ،، ،، ،،
G = وزن الزلط ،، ،، ،، ،، ،، ،، ،،
W = وزن المـاء ،، ،، ،، ،، ،، ،، ،،

G_c , G_s , G_g = الوزن النوعى للأسمنت والرمل والزلط على التوالى

علماً بأن واحد متر مكعب من الخرسانة = ١٠٠٠ لتر.

وفى هذه الطريقة يلزم تحديد كلاً مما يأتى طبقا للإشتراطات المطلوبة فى مقاومة الخرسانة المتصلدة Strength والإشتراطات المطلوبة فى مدى تشغيل Workability الخرسانة الطازجة:

١ـ كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة.
٢ـ نسبة الماء إلى الأسمنت بالوزن (م/س) أو كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة.
٣ـ نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير فى الركام المستخدم.
٤ـ الوزن النوعى للأسمنت والركام الكبير والركام الصغير.

وتحدد البيانات سالفة الذكر من واقع الخبرة Experience ومن النتائج العملية Practice ومن الإختبارات المعملية Laboratory Tests أى أننا نحدد قيمة C ، W/C ، G/S وكذلك نحدد الأوزان النوعية G_c G_s , G_g ثم تُطبق المعادلة سالفة الذكر لتعيين وزن كل من الرمل والزلط. واذا أريد بيان النسب بين المكونات الحبيبية للخرسانة بالوزن للأسمنت وبالحجم للركام يلزم معرفة الوزن الحجمى لكل من الرمل والزلط (أى وزن المتر المكعب) وذلك من واقع الخبرة والتجارب.

❐ وتتضح تلك الطريقة فى المثال التالى :

المطلوب تصميم خلطة خرسانية بحيث تكون الخرسانة الطازجة لدنة القوام Plastic وبحيث تكون الخرسانة المتصلدة ذات مقاومة للضغط بعد ٢٨ يوم تساوى ٢٤٠ كج/سم^{٢}. مع مراعاة أن الركام الخليط المستخدم يمر منه نسبة ٤٠% من المنخل القياسى ١٦/٣ مع العلم بأن:
الوزن النوعى للأسمنت = ٣,١٥.
الون النوعى للركام (الرمل أو الزلط) = ٢,٦٥.
الوزن الحجمى للركام (الرمل أو الزلط) = ١٧٠٠ كج/سم^{٣}.

الحـــل

أ ـ تُعين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير (الزلط):
يعتبر المار من المنخل القياسى ١٦/٣ هو الرمل والمحتجز عليه هو الزلط. إذن يتبين أن النسبة المئوية للرمل فى الركام الخليط تساوى ٤٠% وبالتالى الزلط يساوى ٦٠%.

ملاحظة: هذه النسبة قد تفرض طبقا للخبرة والسوابق العملية ـ والنسبة الشائعة الإستخدام قد تفرض مباشرة على أساس ٣٣% للرمل أى نسبة الرمل إلى الزلط تساوى ١ : ٢

ب ـ تفرض كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة على أساس مقاومة الخرسانة المتصلدة بعد ٢٨ يوم أو على أساس أى متطلبات أخرى خاصة بمتانة الخرسانة أو الظروف التى تعمل فيها.

ومن الخبرة العملية يمكن إستخدام هذه العلاقة:
كمية الأسمنت اللازمة للمترالمكعب = مقاومة للضغط بعد ٢٨ يوم (كج/سم^{٢}) + ٥٠ إلى ١٠٠

إذن كمية الأسمنت اللازمة للمتر المكعب = ٢٤٠ + ٦٠ = ٣٠٠ كج/م٣.

ج - تُعين كمية الماء اللازمة للمتر المكعب من الخرسانة طبقا لمحتوى الأسمنت فى الخلطة والمقاس الإعتبارى للركام المستخدم وكذلك درجة القابلية للتشغيل المطلوبة. وهذه الكمية قد تفرض مباشرة طبقا للخبرة أو بالإستعانة بالجدول (٥-١).

فى هذا المثال نفرض أن (م/س) = ٠,٥

إذن كمية الماء للمتر المكعب من الخرسانة = ١٥٠ لتر.

جدول (٥-١) العلاقة بين كمية ماء الخلط ومحتوى الأسمنت.

المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)	قيمة (م/س) لمحتوى أسمنت (كج) لكل متر مكعب خرسانة				
	٢٠٠	٢٥٠	٣٠٠	٣٥٠	٤٠٠
١٠	٠,٧٠	٠,٦٠	٠,٥٠	٠,٤٧٥	٠,٤٠
٢٠	٠,٦٥	٠,٥٥	٠,٤٥	٠,٤٢٥	٠,٣٨٥
٤٠	٠,٦١	٠,٤٨	٠,٤٢٥	٠,٣٨٥	٠,٣٧

د- يحسب تصميم الخلطة الخرسانية كما يلى :

وزن الزلط = (٦٠ / ٤٠) وزن الرمل = ١,٥ وزن الرمل

$$\text{Absolute Volume} = \frac{300}{3.15} + \frac{S}{2.65} + \frac{1.5S}{2.65} + \frac{150}{1.0} = 1000 \text{ litres}$$

وزن الرمل ،، ،، ، ،، = ٨٠٠ كج.

وزن الزلط ،، ،، ، ،، = ١٢٠٠ كج.

❑ نسب الخلطة الخرسانية بالوزن :

أسمنت	رمل	زلط	ماء
٣٠٠ كج	٨٠٠ كج	١٢٠٠ كج	١٥٠ كج
١ :	٢,٦٧ :	٤ :	٠,٥

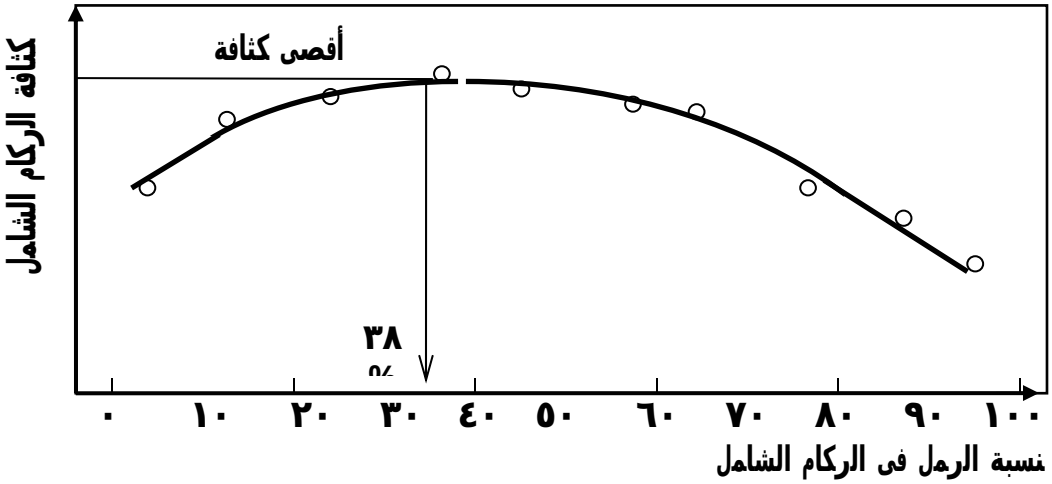
❑ نسبة الخلطة الخرسانية بالحجم :

أسمنت	رمل	زلط	ماء
$\frac{٣٠٠}{٥٠}$ شكارة	$\frac{٨٠٠}{١٧٠٠}$ م٣	$\frac{١٢٠٠}{١٧٠٠}$ م٣	١٥٠ لتر
٦ شكاير	٠,٤٧ م٣	٠,٧١ م٣	١٥٠ لتر

وتجدر الأشارة إلى أن تعيين نسبة الركام الصغير (الرمل) إلى الركام الكبير (الزلط) يمكن أن يتم على أسس أخرى هامه منها :

أ- طريقة الكثافة القصوى Optimum Unit Weight Method

وفيها يتم عمل خلطات من الركام الجاف فقط تحتوى على نسباً مختلفة من الرمل إلى الركام الخليط فمثلاً : صفر % ، ١٠ % ، ٢٠ % ، ....١٠٠ % مع تعيين وحدة الوزن لكل منها ثم نوقع القراءات على منحنى ويمكن من هذا المنحنى إيجاد نسبة الرمل التى ستكون عندها وحدة الوزن نهاية قصوى أى الحصول على أقل نسبة فراغات ممكنة. ويتضح ذلك من شكل (٥-٣) الذى يبين أن نسبة الرمل ٣٦ % تعطى أقصى وحدة وزن للركام الخليط.



شكل (٥-٣) الكثافة القصوى للركام الخليط

ب- طريقة المساحة السطحية للركام Surface Area Method

الأساس العلمى فى هذه الطريقة هو الربط بين كمية عجينة الأسمنت فى الخلطة الخرسانية والمساحة السطحية للركام الذى تغلف أسطحة لإتمام عملية الإلتصاق بين حبيباته ومعنى ذلك بأنه فى الخلطات الخرسانية ذات الركام الصغير المقاس فإنه يحتاج لزيادة كمية الأسمنت بسبب زيادة المساحة السطحية لهذا الركام. وإحدى طرق التعبير المذكورة هى إستخدام المساحة السطحية للركام الخليط ومقاومة الضغط للخرسانة وذلك بمعرفة مقاومة الضغط المطلوبة للخرسانة أو قد تفرض المساحة السطحية للركام الخليط بقيمة تتراوح من ٢٤ إلى ٢٦ سم^{٢}/جم التى تعطى غالبا أكبر قيمة للمقاومة. وبالتالى نحدد التدرج المطلوب أو نسبة الرمل فى الركام الشامل.

٥-٥ تصميم الخلطات الخرسانية عالية المقاومة Design of HSC Mixes

الخلطات الخرسانية عالية المقاومة تتميز بوجود عدد كبير من المواد التى ينبغى إختيار الكميات والنسب المثلى منها للوصول إلى خرسانة ذات خواص مرغوبة خاصة من ناحية القابلية للتشغيل والمقاومة والمعمرية (المتانة). وتصميم الخلطات الخرسانية عالية المقاومة يعتمد على نوعية وجودة المواد بدرجة أكبر من إعتماده على نسب الخلطة. ولقد سبق أن تناولنا الخصائص المطلوب توافرها فى مكونات الخرسانة عالية المقاومة وذلك فى باب الخرسانات الخاصة. وفيما يلى شرح موجز لخطوات تصميم الخلطات الخرسانية عالية المقاومة

١- يتم تقرير إستخدام مادة غبار السليكا فى الحالات الآتية:

- إذا كانت المقاومة المطلوبة للخرسانة أكبر من ٨٠٠ كج/سم٢.
- عندما تكون الخرسانة قليلة النفاذية ضرورية ومرغوبة.
- فى حالة خرسانة الضخ حتى لايحدث إنفصال حبيبى.
- عندما تكون الخرسانة معرضة لمواد كيميائية خاصة الكلوريدات.

٢- يمكن فرض محتوى غبار السليكا طبقاً لمقاومة الضغط المطلوبة كما هو موضح بالجدول الآتى:

مقاومة الضغط للخرسانة كج/سم٢	نسبة غبار السليكا المضاف كنسبة من وزن الأسمنت
٧٠٠ إلى ٨٠٠	٥ إلى ١٠%
٨٠٠ إلى ٩٠٠	١٠ إلى ١٥%
٩٠٠ إلى ١٠٠٠	١٥ إلى ٢٠%
أكبر من ١٠٠٠	٢٠ إلى ٢٥%

ملحوظة : يفضل أخذ الحد الأعلى لنسبة غبار السليكا عندما يكون الزلط هو المستخدم فى الخلطة أما فى حالة إستخدام الدولوميت أو الجرانيت فيفضل أخذ الحد الأدنى لنسبة غبار السليكا.

٣- يتم تحديد نوع الأسمنت المستخدم طبقاً لتقرير التربة الخاص بالعملية أو اللوح التنفيذية للمنشأ وعادة ما يكون إما أسمنت بورتلاندى عادى أو أسمنت بورتلاندى فائق النعومة أو أسمنت مقاوم للكبريتات. وبصفة عامة فإن كفاءة مادة غبار السليكا تكون أكبر فى حالة إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى بالمقارنة بباقى أنواع الأسمنت. ولا يُنصح بإستخدام الأسمنت المقاوم للكبريتات إلا فى حالة وجود نسبة عالية من أملاح الكبريتات فى التربة أو فى المياه الجوفية. أما فى الأحوال العادية أو الأحوال التى تكون فيها مقاومة الكلوريدات أهم من مقاومة الكبريتات فينصح بإستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى.

٤- يحدد محتوى الأسمنت فى المتر المكعب خرسانة طبقاً لمحتوى غبار السليكا المستخدم كمايلى:

نسبة غبار السليكا المضاف كنسبة من وزن الأسمنت	محتوى الأسمنت كج/م^{٣}
١٥ إلى ٢٠%	٤٥٠
٥ إلى ١٥%	٤٧٥
عدم وجود غبار السليكا	٥٠٠

٥- يتم إختيار نوع الملدنات (Superplasticizers) بحيث يكون من النوع المطابق للمواصفات الأمريكية ASTM C494 Type F. وفى حالة الحرارة الشديدة أو فى حالة طول مدة صب وصناعة الخرسانة فيفضل نوع الملدنات المطابق للمواصفات الأمريكية ASTM C494 Type G

٦- يمكن فرض نسبة الملدنات (Superplasticizers) طبقاً لمقاومة الضغط المطلوبة وذلك بعد عمل إختبار تأكيدى على خلطة تجريبية صغيرة للتأكد من توافق المادة مع الأسمنت المستخدم والحصول على المقاومة و القابلية للتشغيل المطلوبتين.

مقاومة الضغط للخرسانة كج/سم^{٢}	نسبة الملدنات كنسبة من وزن الأسمنت + غبار السليكا
٤٠٠ إلى ٥٠٠	١,٠ إلى ١,٥%
٥٠٠ إلى ٦٠٠	١,٥ إلى ٢,٠%
٦٠٠ إلى ٧٠٠	٢,٠ إلى ٢,٥%
أكبر من ٧٠٠	٢,٥ إلى ٣,٥%

٧- يتم إستخدام الزلط كركام كبير فى الخلطة الخرسانية إذا كانت مقاومة الضغط المطلوبة لاتتجاوز ٧٥٠ أو ٨٠٠ كج/سم^{٢} وفى حالة خرسانة ذات مقاومة أكبر من ذلك فمن الضرورى إستخدام كسر حجر قوى (دولوميت أو جرانيت).

٨- يفضل أن لا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر للركام الكبير عن ٢٠ مم. والركام مقاس ١٤ مم أو حتى ١٠ مم يعطى مقاومة أفضل بشرط أن يكون الركام متدرج وسليم وقوى. وتفرض النسبة بين الركام الكبير والرمل وفقاً لأى طريقة كما فى حالة الخرسانة التقليدية (عادية المقاومة).

٩- تفرض نسبة الماء إلى المواد الأسمنتية (أسمنت + غبار سليكا) من المعادلة التجريبية الآتية مع مراعاة أن لايقل وزن الماء عن ٠,٢٢ من وزن المواد الأسمنتية. علماً بأن هذه المعادلة مستنتجة على أساس خرسانة تحتوى على ملدنات وتعطى خلطة لدنة القوام (هبوط = ٨

إلى ١٢ سم). وقد تم إستنتاج هذه المعادلة بتحليل نتائج أكثر من ١٥٠ خلطة خرسانية ذات مقاومة تتراوح من ٥٠٠ إلى ١١٠٠ كج/سم٢.

$$w/cm = \frac{\log\left\{\frac{\alpha\,(1000 - C - SF)}{f_c}\right\}}{3.0 * \log(\beta)}$$

حيث:

w/cm النسبة بين وزن الماء ووزن المواد الأسمنتية (الأسمنت + غبار السليكا)

f_c هى مقاومة الخرسانة كج/سم٢

C هى وزن الأسمنت فى المتر المكعب من الخرسانة - كج

SF هى وزن غبار السليكا فى المتر المكعب من الخرسانة - كج

α عامل يتوقف على نوع الركام الكبير المستخدم ويساوى ١٣ ، ١٤ ، ١٥ للزلط والجرانيت والدولوميت على الترتيب.

β عامل يتوقف على نوع الأسمنت ويساوى ١٣,٠ ، ١٢ ، ١٠,٥ للأسمنت البورتلاندى العادى والأسمنت المقاوم للكبريتات والأسمنت فائق النعومة على الترتيب.

والجدول الآتى يعطى بعض القيم لنسبة الماء إلى المواد الأسمنتية (*w/cm*) وذلك لتحقيق مقاومة ضغط بعد ٢٨ يوم = ١٠٠٠ كج/سم٢ بإستخدام محتوى أسمنت = ٤٧٥ كج/م٣.

المقاومة المطلوبة = ١٠٠٠ كج/سم٢ محتوى الأسمنت = ٤٧٥ كج/م٣		غبار السليكا كنسبة مئوية من وزن الأسمنت				
		٠%	١٠%	١٥%	٢٠%	٢٥%
- أسمنت بورتلاندى عادى	زلط	٠,٢٤٤	٠,٢٣٧	٠,٢٣١	٠,٢٢٤	٠,٢١٦
- أسمنت مقاوم للكبريتات	زلط	٠,٢٥١	٠,٢٤٥	٠,٢٣٨	٠,٢٣١	٠,٢٢٣
- أسمنت فائق النعومة	زلط	٠,٢٦٦	٠,٢٥٩	٠,٢٥١	٠,٢٤٤	٠,٢٣٦
- أسمنت بورتلاندى عادى	دولوميت	٠,٢٦٢	٠,٢٥٦	٠,٢٤٩	٠,٢٤٢	٠,٢٣٥
- أسمنت مقاوم للكبريتات	دولوميت	٠,٢٧١	٠,٢٦٤	٠,٢٥٧	٠,٢٥٠	٠,٢٤٢
- أسمنت فائق النعومة	دولوميت	٠,٢٨٦	٠,٢٧٩	٠,٢٧٢	٠,٢٦٤	٠,٢٥٦

١٠- **يتم تطبيق معادلة الحجم المطلق** بنفس الطريقة المتبعة سابقاً فى حالة الخرسانة عادية المقاومة وذلك لحساب أوزان المكونات المختلفة فى المتر المكعب من الخرسانة مع مراعاة فرض قيم الأوزان النوعية للمواد المختلفة إذا لم تتوافر بيانات عنها كما يلى:

الأسمنت = ٣,١٥ غبار السليكا = ٢,١٥ الملدنات = ١,١٥

الزلط والرمل = ٢,٦٥ الدولوميت = ٢,٧ الجرانيت = ٢,٧

مثال:

المطلوب تصميم خلطة خرسانية عالية المقاومة وتحديد الكميات اللازمة لعمل واحد متر مكعب من الخرسانة إذا علم أن:

- **مقاومة الضغط المطلوبة = ٨٠٠ كج/سم٢**
- **الهبوط بإستخدام المخروط القياسى = ١٠ سم**
- **نوع الأسمنت المستخدم هو أسمنت مقاوم للكبريتات**
- **الركام المستخدم عبارة عن رمل طبيعى حرش و دولوميت مقاس ١٤مم ، والتدرج الحبيبى لكلٍ من الرمل والدولوميت كما يلى:**

فتحة المنخل - مم	٢٠	١٠	٤,٧٥	٢,٣٦	١,١٨	٠,٦	٠,٣	٠,١٥
دولوميت	١٠٠	٨٥	٦	-	-	-	-	-
رمـــل	-	١٠٠	٩٤	٨٠	٦٥	٥٠	١٠	صفر

تصميم الخلطة

١- نسبة غبار السليكا المناظر لمقاومة ٨٠٠ كج/سم٢ مع استخدام الدولوميت = ١٠% من وزن الأسمنت.

٢- محتوى الأسمنت المناظر لنسبة ١٠% من غبار السليكا = ٤٧٥ كج/م٣.

∴ وزن غبار السليكا = ٤٧٥ × ١٠% = ٤٧,٥ كج/م٣.

٣- نسبة الملدنات المطلوبة = ٣% من وزن المواد الأسمنتية وتكون من النوع ASTM-Type G

∴ وزن الملدنات فى المتر المكعب = ٠,٠٣ × (٤٧٥ + ٤٧,٥) = ١٥,٦٧٥ كج

٤- بتطبيق معادلة *w/cm* مع مراعاة أن قيمة α = ١٥ وقيمة β = ١٢ نحصل على نسبة الماء إلى المواد الأسمنتية = ٠,٢٩٤

∴ وزن الماء فى المتر المكعب = ٠,٢٩٤ (٤٧٥ + ٤٧,٥) = ١٥٣,٦ كج

٥- يتم خلط الركام الكبير مع الركام الصغير بحيث يحقق أن ٣٠% من وزن الركام الخليط يمر خلال المنخل رقم ٤,٧٥. إذن بإستخدام النتائج فى جدول التدرج نجد أن:

٠,٩٤ وزن الرمل + ٠,٠٦ وزن الدولوميت = ٠,٣٠ (وزن الرمل + وزن الدولوميت)

∴ وزن الرمل = ٠,٣٧٥ وزن الدولوميت.

٦- بتطبيق معادلة الحجم المطلق:

$$\frac{475}{3.15}+\frac{47.5}{2.15}+\frac{0.375\ W}{2.65}+\frac{W}{2.7}+\frac{15.675}{1.15}+\frac{153.6}{1.0}=1000$$

حيث W هى وزن الدولوميت.

بحل المعادلة نحصل على وزن الدولوميت = ١٢٨٩ كج

∴ وزن الرمل = ١٢٨٩ × ٠,٣٧٥ = ٤٨٣ كج

٧- و يكون وزن المكونات المختلفة اللازمة لعمل واحد متر مكعب خرسانة هى:

- **وزن الأسمنت المقاوم للكبريتات = ٤٧٥ كج**
- **وزن غبار السليكا = ٤٧,٥ كج**
- **وزن الدولوميت = ١٢٨٩ كج**
- **وزن الرمل = ٤٨٣ كج**
- **وزن الملدنات ASTM C494 Type G = ١٥,٦٧٥ كج**
- **وزن الماء = ١٥٣,٦ كج**

٥-٦ بعض الخلطات الخرسانية ذات المتطلبات الخاصة

Concrete Mixes With Special Requirements

قد يكون مطلوباً فى بعض الأحيان تصميم خلطة خرسانية لها خواص معينة أو تحقق شروطاً معينة تكون ضرورية من الناحية التصميمية أو التنفيذية فمثلاً قد يطلب أن تكون الخلطة ذات مقاومة عالية أو أن يكون لها قوام إنسيابى أو أن تحتفظ الخلطة بقوامها اللدن لمدة طويلة (قد تصل إلى ساعتين). والأمثلة الآتية هى نتائج معملية لبعض الخلطات التى تم تنفيذها فى معامل كلية الهندسة بالمنصورة.

الخلطة رقم ١

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٤٠٠ كج/سم^{٢}.
- يشترط عدم إستخدام أية إضافات.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كج/م^{٣}.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٤٣ (٢١٥ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ مم).

النتائج:

- الهبوط = ١٠ سم.
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٣٢٢ كج/سم^{٢}.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٤٠٥ كج/سم^{٢}.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٤٢٧ كج/سم^{٢}.

الخلطة رقم ٢

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٤٠٠ كج/سم٢.
- يمكن إستخدام إضافات.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم ويستمر بدون فقد لمدة ساعة على الأقل.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٤٥٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٢٦ (١١٧ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ مم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط الأولى = ١٤ سم - الهبوط بعد ساعة = ١٠ سم.
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٣٧٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٤٤٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٤٩٠ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٣

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٦٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٨ سم ويستمر بدون فقد لمدة ساعة على الأقل.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٣٠ (١٥٠ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلى الدولوميت=٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش ودولوميت مقاس ١٦ مم).
- إستخدام ٤% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط الأولى = ١٢ سم - الهبوط بعد ساعة = ٩ سم.
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٥٥٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٧٠٠ كج/سم٢.

- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٧٤٧ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٤

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٥٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٨ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٤٥٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٣٢ (١٤٤ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ سم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط = ٨ سم
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٤٦٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٥٥٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٥٧٥ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٥

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٨٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ٥ سم.

الخلطة المقترحة:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٥٠٠ كج/م٣.
- غبار السليكا ١٥% من وزن الأسمنت (٧٥ كج فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٢٥ (١٢٥ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل = ٢٥% من الركام الشامل.
- دولوميت مقاس ١٠ مم = ٢٥% من الركام الشامل.
- دولوميت مقاس ١٦ مم = ٥٠% من الركام الشامل.
- إستخدام ٣,٥% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط = ٥ سم

- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ٧١٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٨٥٠ كج/سم٢.

الخلطة رقم ٦

المطلوب:

- مقاومة الضغط = ٢٠٠ كج/سم٢.
- الهبوط فى حدود ١٠ سم.

الخلطة المقترحة الأولى بدون إضافات:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٢٧٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٧٠ (١٨٩ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ سم).

النتائج:

- الهبوط = ١٠ سم
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ١٢٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٢٢٠ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٢٣٠ كج/سم٢.

الخلطة المقترحة الثانية بإستخدام إضافات:

- أسمنت بورتلاندى عادى ٢٠٠ كج/م٣.
- نسبة الماء إلى الأسمنت = ٠,٥٩ (١١٨ لتر ماء فى المتر المكعب خرسانة).
- نسبة الرمل إلىالزلط = ٠,٣٥ : ٠,٦٥ (رمل حرش وزلط مقاس ١٦ سم).
- إستخدام ٣% ملدنات ASTM type G.

النتائج:

- الهبوط = ١٠,٥ سم
- مقاومة الضغط بعد ٧ أيام = ١٥٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم = ٢٠٥ كج/سم٢.
- مقاومة الضغط بعد ٥٦ يوم = ٢٢٠ كج/سم٢.

****

الباب السادس

ضبط جودة الخرسانة إحصائيا

Statistical Quality Control

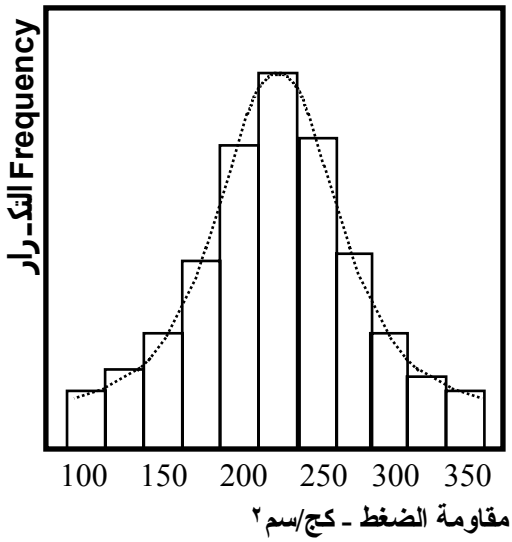
٦-١ التغير فى مقاومة الخرسانة

غالباً فإن مقاومة الخرسانة المنتجة فى الموقع تكون متغيرة من خلطة إلى خلطة وأيضا خلال الخلطة الواحدة. ويرجع هذا التغير إلى عوامل عديدة منها:

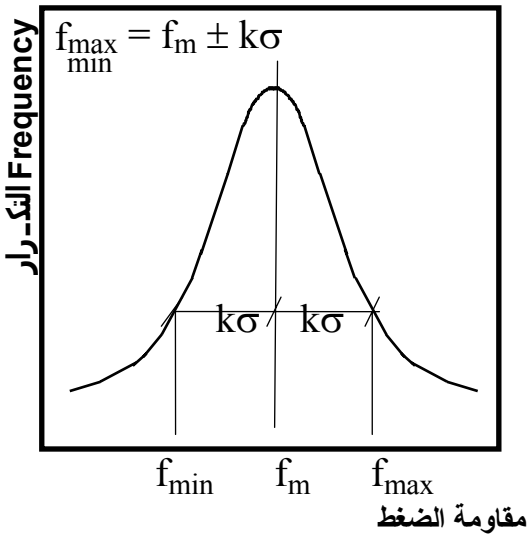
١- إختلاف جودة وخواص المكونات (أسمنت - ركام - ماء - إضافات).
٢- التغير فى نسبة الماء بالخلطة.
٣- التغير فى خطوات صناعة الخرسانة (طريقة الخلط - النقل - الصب - الدمك - المصنعية).
٤- التغير فى درجة الحرارة أو عملية المعالجة.
٥- التغير نتيجة أخطاء فى صناعة قوالب الصب.
٦- وجود أخطاء أثناء الإختبار (سرعة الماكينة - عدم مركزية العينة - الماكينة غير معايرة).

٦-٢ منحنى التوزيع التكرارى

الغرض من ضبط جودة الخرسانة إحصائيا هو تحليل النتائج للوقوف على مدى تجانس وجودة الخرسانة و مطابقتها للمواصفات. فعندما يكون عندنا عدد كبير من النتائج (مقاومة الضغط) فإنه يكون من المفيد تنظيم مجموعة البيانات على شكل توزيع تكرارى (هيستوجرام) كما فى شكل(٦-١) حيث يمثل المحور الأفقى قيمة المقاومة (عبارة عن فترات فاصلة) ويمثل المحور الرأسى عدد العينات (التكرار) عند كل مقاومة معينة.



شكل (٦-١) هيستوجرام التكرار



شكل (٦-٢) منحنى التوزيع التكراري

عندما يصل عرض الفترة إلى قيمة صغيرة جداً (≅ صفر) ويكون عدد العينات كبيرجداً (∞ ≅) فإن:

⇩

الهيستوجرام يتحول إلى منحنى يعرف بإسم منحنى التوزيع التكراري Distribution Curve.

وعندما تكون النتائج على أبعاد متساوية من القيمة المتوسطة و يكون أكبر عدد من العينات له قيمة مساوية للمتوسط فإن:

⇩

التوزيع يكون طبيعى ويعرف المنحنى بإسم منحنى التوزيع التكرارى الطبيعى Normal Distribution Curve ويكون شكله على شكل الجرس Bell Shape كما فى شكل (٦-٢). وخصائص منحنى التوزيع التكرارى الطبيعى تعتمد على قيمتى المتوسط (f_m) والإنحراف المعيارى (σ).

$$f_{\substack{max \\ min}} = f_m \pm k\,\sigma$$

حيث k هى معامل الإحتمالات ويعبر عن إحتمال وقوع مقاومة معينة خارج الحدود ($f_m \pm k\,\sigma$) و σ هى الإنحراف المعيارى. أما f_m فتمثل القيمة المتوسطة. وقيمة الانحراف المعياري تعرف على أنها جذر متوسط مربع قيمة الإنحرافات

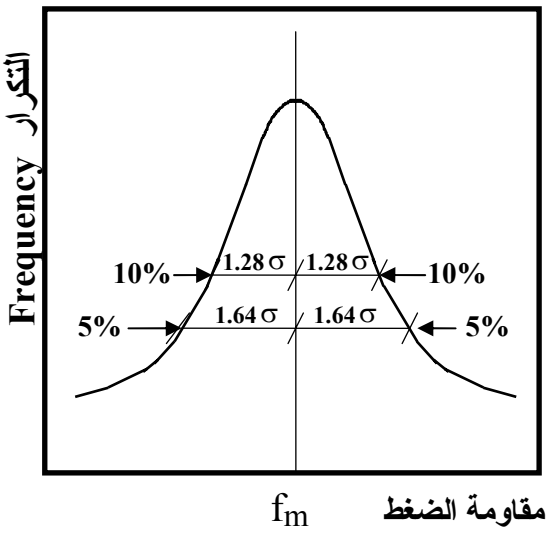
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\bar{x})^2}{n-1}} \qquad n > 20$$

or

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\bar{x})^2}{n}} \qquad n \le 20$$

جدول(٦-١) قيمة معامل الإحتمالات

k	احتمال وقوع مقاومة معينة خارج ($f_m \pm k\,\sigma$)	احتمال وقوع مقاومة معينة خارج ($f_m - k\,\sigma$)
٣,١	%٠,٢	%٠,١
٢,٣٣	%٢	%١
١,٦٤	%١٠	%٥
١,٢٨	%٢٠	%١٠
١,٠	%٣١,٨	%١٥,٩



شكل (٦-٣) خصائص منحنى التوزيع الطبيعى.

٦-٣ المقاومة المتوسطة والمقاومة المميزة

٦-٣-١ المقاومة المميزة (رتبة الخرسانة) Characteristic Strength (f_{cu})

هى قيمة إجهاد كسر المكعب الخرسانى القياسى الذى من غير المحتمل أن يقل عنه أكثر من ٥% من عدد نتائج إختبارات تحديد المقاومة أثناء التنفيذ (درجة ثقة=٩٥%). والمقاومة المميزة هى المقاومة التى يجرى على أساسها المهندس الإنشائى حساباته.

٦-٣-٢ متوسط المقاومة المستهدف Target Mean Strength (f_m)

تصمم خلطة الخرسانة بتحديد محتويات مكوناتها بحيث يكون متوسط المقاومة المستهدف مساويا لمجموع المقاومة المميزة (f_{cu}) مضافاً إليه هامش أمان (M) يكفل الحصول على المقاومة المميزة المطلوبة $f_m = f_{cu} + M$.

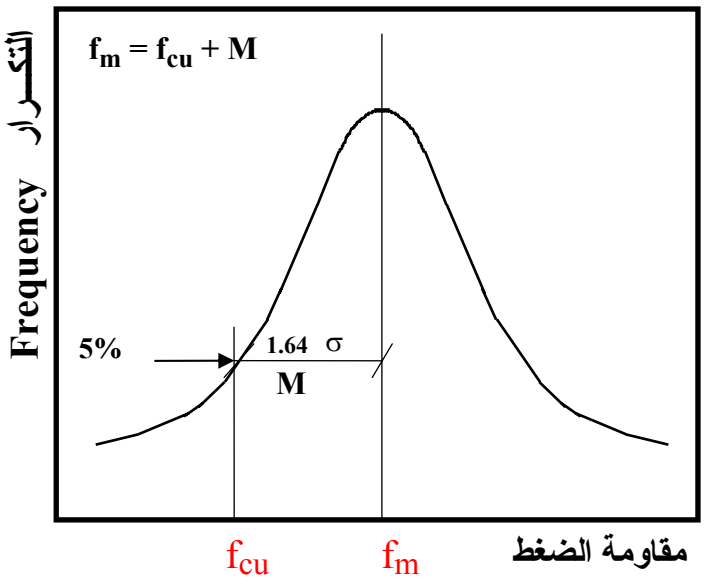
ويمكننا تخيل قيمة (f_m) ، (f_{cu}) على منحنى التوزيع التكرارى كما يلى:

* فى حالة أن يكون مطلوب درجة ثقة Confidence ٩٥% فإن $k = 1.64$ ويكون

$$f_m = f_{cu} + 1.64\ \sigma$$

* فى حالة أن يكون مطلوب درجة ثقة Confidence ٩٠% فإن $k = 1.28$ ويكون

$$f_m = f_{cu} + 1.28\ \sigma$$



شكل (٦-٤) المقاومة المميزة والمقاومة المتوسطة.

٦-٤ مستويات التحكم فى الجودة

استخدم الانحراف المعياري (σ) كمقياس لدرجة ضبط الجودة للخرسانة حيث أنه كلما زادت قيمة σ دل ذلك على ضعف التحكم فى الجودة والعكس صحيح ويمثل جدول (٦-٢) قيم σ المناظرة لدرجة التحكم فى الجودة:

جدول (٦-٢) مستويات التحكم فى جودة الخرسانة طبقا لمعهد أبحاث الخرسانة الأمريكى.

درجة التحكم	ممتازة	جيدة جداً	جيدة	مقبولة	رديئة
σ كج/سم٢	أقل من ٢٨	٢٨-٣٥	٣٥-٤٢	٤٢ - ٤٩	أكبر من ٤٩

ونظراً لأن قيمة الإنحراف المعيارى تعتمد على قيمة المقاومة فقد وُجد أنها تكون كبيرة نسبيا فى حالة الخرسانة عالية المقاومة وبالتالى يكون من الأفضل إستخدام معامل الإختلاف (v) بدلاً من الإنحراف المعيارى (σ) فى تحديد مستوى التحكم فى الجودة كما فى جدول (٦-٣).

$$v = \frac{\sigma}{f_m}$$

$$f_m = f_{cu} + k\, v\, f_m \quad \rightarrow \quad f_{cu} = f_m\,(1-kv)$$

$$f_m = \frac{f_{cu}}{1 - kv}$$

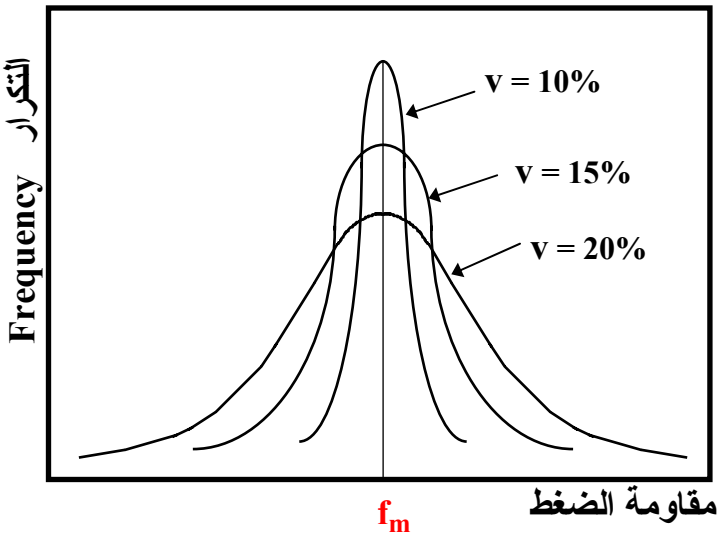
فإذا كانت درجة الثقة ٩٥ % فإن قيمة k تكون ١,٦٤.
أما إذا كانت درجة الثقة ٩٠ % فإن قيمة k تكون ١,٢٨.

تدريب: أحسب كلاً من قيمتى الإنحراف المعيارى (σ) ومعامل الإختلاف (v) للمجموعتين الآتيتين وعلق على النتائج.

المجموعة الأولى خرسانة تقليدية: ٢٠٠ ، ٢١٠ ، ٢٢٠ كج/سم٢
المجموعة الثانية خرسانة عالية المقاومة: ١٠٠٠ ، ١٠٥٠ ، ١١٠٠ كج/سم٢

جدول (٦-٣) مستويات التحكم فى جودة الخرسانة طبقا لقيمة معامل الإختلاف.

درجة التحكم	ممتازة	جيدة	مقبولة	ضعيفة
v %	أقل من ١٠	١٠ - ١٥	١٥ - ٢٠	أكبر من ٢٠



شكل (٦-٥) تأثير معامل الإختلاف على شكل منحنى التوزيع.

ومن الجدير بالذكر أن شكل منحنى التوزيع التكرارى يتأثر كثيراً نتيجة التغير فى قيمة معامل الإختلاف (v) حيث يزداد تدبباً كلما قل التغير فى قيمة مقاومة الضغط وبالتالى قلت قيمة (v) كما بالشكل (٦-٥).

٦-٥ الحكم على نتيجة إختبار الخرسانة

وعموماً فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية قد أعتبر الخرسانة مستوفية لرتبة الخرسانة المميزة المطلوبة أثناء التنفيذ إذا تحقق مايلى:

١- إذا كان عدد مكعبات الضغط للخرسانة أكثر من ٢٠ عينة فيشترط أن لا تزيد عدد نتائج اختبارات المكعبات التى تقل عن المقاومة المميزة المطلوبة على قراءة واحدة لكل عشرين قراءة (٥٪) كما يشترط أن لا يزيد الفرق بين أكبر قراءة وأصغر قراءة (المدى) على ٢٥٪ من متوسط جميع القراءات.

٢- إذا كان عدد مكعبات الضغط للخرسانة أقل من ٢٠ مكعب فيشترط أن لا تقل أية نتيجة إختبار عن المقاومة المميزة المطلوبة كما يشترط أن لا يزيد الفرق بين أكبر قراءة وأصغر قراءة (المدى) على ٢٥٪ من متوسط جميع القراءات.

٦- ٦ تطبيـــقات

٦-٦-١ تصميم الخلطة الخرسانية اللازمة لمشروع جديد

هنا يكون المطلوب هو حساب قيمة المقاومة المتوسطة f_m التى تحقق قيمة معينة للمقاومة المميزة f_{cu} (بمعنى قيمة المقاومة التى من المحتمل أن لا يقل عنها إلا نسبة معينة) وذلك بدلالة درجة التحكم المتوقع فى الجودة.

مثال ١: أحسب المقاومة المتوسطة المطلوبة لتصميم خلطة خرسانية إذا كانت قيمة المقاومة المميزة التى صُمم عليها المشروع هى ٢٥٠ كجم/سم^2 (لا يقل عنها أكثر من ٥٪ من النتائج) وذلك فى حالتى ورجة تحكم فى الجودة جيدة ومقبولة.

الحـــــــل

أ- حالة تحكم جيدة (v=0.125)

$$f_m = \frac{f_{cu}}{1-1.64v} = \frac{250}{1-1.64\ (0.125)} = 314.5\ \ kg/cm^2$$

ب- حالة تحكم مقبولة (v=0.175)

$$f_m = \frac{f_{cu}}{1-1.64v} = \frac{250}{1-1.64\ (0.175)} = 350.6\ \ kg/cm^2$$

٦-٦-٢ تعيين قيمة المقاومة المميزة

إذا كانت قيمة المقاومة المتوسطة لعدد من العينات معروفة عند درجة معينة من التحكم فى الجودة فما هى قيمة المقاومة المميزة التى يتم تصميم المشروع إنشائياً عليها (التى يتوقع أن لايقل عن قيمتها إلا نسبة معينة من النتائج).

مثال ٢ : إذا كان متوسط مقاومة الضغط لخلطة خرسانية هو ٢٧٥ كجم/سم^2 وكان الإنحراف المعيارى مساوياً ٢٠ كجم/سم^2. فما هى قيمة المقاومة التى يتوقع أن لايقل عن قيمتها أكثر من ١٠٪ من النتائج (٩٠٪ ورجة ثقة).

الحـــــــل

$$f_{cu} = f_m\ (1-kv) \qquad \text{or} \qquad f_{cu} = f_m - k\ \sigma$$

فى حالة درجة ثقة ٩٠% فإن قيمة k تساوى ١,٢٨

$$f_{cu} = 275 - 1.28\ (20) = 249.4\ kg/cm^2$$

٦-٦-٣ الحكم على صلاحية خرسانة منشأ

يمكن الحكم على صلاحية خرسانة منشأ قائم بالفعل وذلك بحساب قيمة التغير فى مقاومة الضغط (التى يمكن قياسها بإستخدام الإختبارات غير المتلفة مثل مطرقة شميدت) وحساب المقاومة التى تحقق درجة ثقة ٩٥% ثم مقارنتها بقيمة المقاومة المميزة التى تم التصميم عليها بالفعل وبالتالى الحكم بقبول أو رفض الخرسانة.

مثال ٣ : عند الحكم على صلاحية خرسانة اللبشة العلوية لمدرسة ابتدائية بالدقهلية تم قياس مقاومة الضغط لعدد ١٧ مكعب مختلف وكانت المقاومة كما يلى:

٢١٨ - ١٨٤ - ١٧٧ - ٢١٥ - ١٨٦ - ١٧٣ - ٢٠٩ - ١٤٢ - ١٥٣ - ١٨٧ ١٨١ - ١٩٣ - ١٤٧ - ٢١٣ - ٢٣١ - ٢٠٠ - ٢٢١.

فما هى قيمة المقاومة الفعلية للخرسانة (ورجة ثقة ٩٥٪) وهل تُقبل الخرسانة أم تُرفض إذا كانت المقاومة المميزة التى تم التصميم على أساسها هى ٢٠٠ كج /سم٢ ؟

الحـــــل

ابتداء فإن الخرسانة مرفوضة ولا تحقق الشروط التى صُممت من أجلها وذلك لوجود أكثر من نتيجة قيمتها أقل من قيمة المقاومة المميزة التى تم التصميم على أساسها وهى ٢٠٠ كج /سم٢ وذلك ضمن عدد عينات أقل من عشرين عينة. أما لحساب قيمة المقاومة الفعلية للمجموعة فينبغى حساب قيمة الإنحراف المعيارى كمايلى:

المفردات	الإنحراف	مربع الإنحراف
٢١٨	٢٨+	٧٨٤
١٨٤	٦-	٣٦
١٧٧	١٣-	١٦٩
٢١٥	٢٥+	٦٢٥
١٨٦	٤-	١٦
١٧٣	١٧-	٢٨٩
٢٠٩	١٩+	٣٦١
١٤٢	٤٨-	٢٣٠٤
١٥٣	٣٧-	١٣٦٩
١٨٧	٣-	٩
١٨١	٩-	٨١
١٩٣	٣+	٩
١٤٧	٤٣-	١٨٤٩
٢١٣	٢٣+	٥٢٩
٢٣١	٤١+	١٦٨١
٢٠٠	١٠+	١٠٠
٢٢١	٣١+	٩٦١
المتوسط =١٩٠	**صفر**	**المجموع= ١١١٧٢**

$$\sigma = \sqrt{\frac{11172}{17}} = 25.6 \ \text{kg/cm}^2$$

$$v = 25.6\ (100) / 190 = 13.5\ \%$$

$$f_{cu} = f_m\ (1\text{-}kv)$$

$$f_{cu} = 190\ (1\text{-}1.64 \times 0.135)$$
$$= 147.9\ \text{kg/cm}^2 < 200$$

∴ الخرسانة ترفض ويمكن إعادة حسابات التصميم على أساس مقاومة مميزة ١٤٧,٩ فقط بدلا من ٢٠٠ كج/سم٢.

٦-٧ التحليل الإحصائى لمجموعة البيانات المفردة

٦-٧-١ مقاييس المركزية

أ - المتوسط Average

$$\overline{X} = \frac{\sum x}{n}$$

مميزاته : هو أكثر المقاييس شيوعاً - سهل الفهم - يأخذ جميع البيانات فى الإعتبار.
عيوبه : يتأثر بالقيم المتطرفة.

مثال : ١٩ ، ٢٠ ، ٢١ ⇐ المتوسط = ٢٠
٤ ، ١٩ ، ٢٠ ، ٢١ ⇐ المتوسط = ١٦
١٩ ، ٢٠ ، ٢١ ، ٧٦ ⇐ المتوسط = ٣٤

ب- الوسيط Median

هو القيمة التى عندها عدد البيانات الأقل منها يساوى عدد البيانات الأكبر منها أو هو قيمة الحد الذى ترتيبة $(\frac{N+1}{2})$.

مميزاته : لا يتأثر بالقيم المتطرفة - يمكن فهمه بسهولة.
عيوبه : يحتاج إلى ترتيب البيانات تنازلياً أو تصاعدياً حتى يمكن حسابه .

مثال : ٩ ، ٥ ، ١٠ ، ١٢ ، ١٥ ⇐ الوسيط = ١٠
١٣ ، ١٧ ، ١١ ، ١٩ ، ١٠ ⇐ الوسيط = ١٣

ج- المنوال Mode

المنوال هو القيمة الأكثر تكراراً فى المجموعة.

مميزاته : لا يتأثر بالقيم المتطرفة - يمكن فهمة بسهولة (مثل الوسيط).
عيوبه: فى كثير من الأحيان لا يوجد منوال حيث لا يتكرر العدد أكثر من مرة وفى حالات أخرى يكون هناك أكثر من منوال.

٢-٧-٦ مقاييس التشتت

أ - المدى = القيمة القصوى - القيمة الصغرى.

ب- الانحراف المعياري (σ) هو الجذر التربيعى لمتوسط مربع إنحراف المفردات عن المتوسط .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

و الانحراف المعياري له نفس وحدات المفردات ويتأثر بقيم المفردات.

ج- معامل الإختلاف هو مقياس للتشتت النسبى أو الإنحراف النسبى.

$$v = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

مثال : احسب قيم v , σ للمجموعتين الآتيتين:

١- خرسانة معتادة ٢٠٠ ، ٢١٠ ، ٢٢٠ كج/سم٢.

٢- خرسانة عالية المقاومة ١٠٠٠ ، ١٠٥٠ ، ١١٠٠ كج/سم٢.

الحـــــــل

المجموعة الأولى: المتوسط = (٢٠٠ + ٢١٠ + ٢٢٠) ÷ ٣ = ٢١٠ كج/سم٢

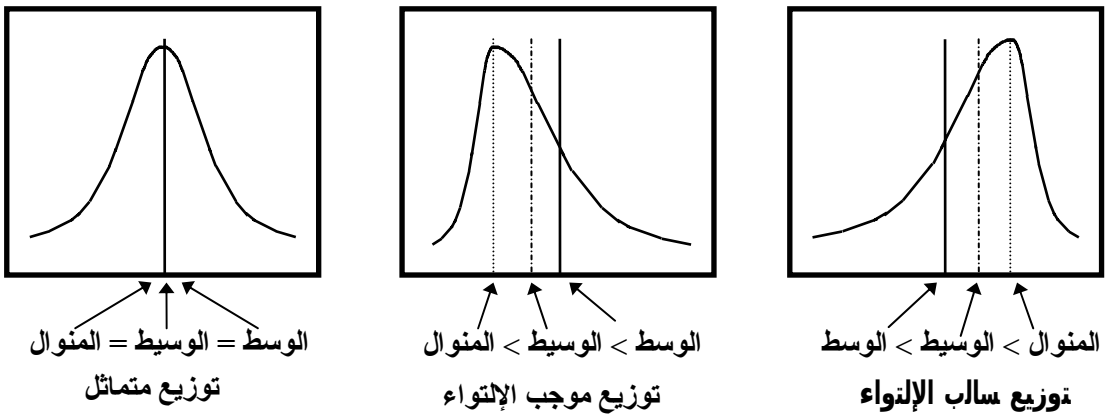
$$\sigma = \sqrt{\frac{(10)^2 + (-10)^2 + (0)^2}{3}} = 8.16 \ \text{kg/cm}^2$$

$$v = \frac{8.16}{210} \text{ x } 100 = 3.89 \ \%$$

المجموعة الثانية: المتوسط = (١٠٠٠ + ١٠٥٠ + ١١٠٠) ÷ ٣ = ١٠٥٠ كج/سم٢

$$\sigma = \sqrt{\frac{(50)^2 + (-50)^2 + (0)^2}{3}} = 40.82 \ \text{kg/cm}^2$$

$$v = \frac{40.82}{1050} \text{ x } 100 = 3.89 \ \%$$



شكل (٦-٦) أشكال الإلتواء المختلفة

٦-٧-٣ أشكال التوزيعات التكرارية

أ- الإلتواء : يكون الإلتواء صفراً إذا كان التوزيع متماثل حول الوسط الحسابى

ويكون التوزيع موجب الإلتواء عندما يكون الوسط < الوسيط < المنوال

ويكون التوزيع سالبا الإلتواء عندما يكون الوسط > الوسيط > المنوال

$$\text{معامل الإلتواء} = \frac{٣\,(\text{المتوسط} - \text{الوسيط})}{\sigma}$$

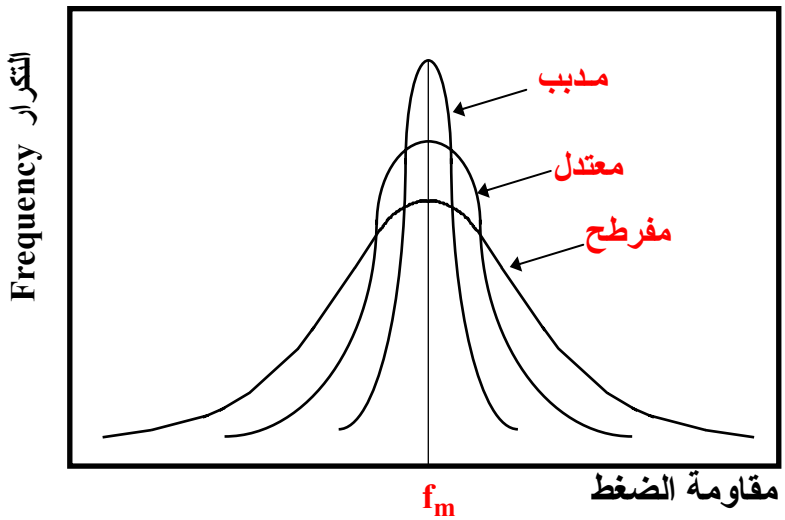
ب - التفرطح

$$\text{معامل التفرطح} = \frac{\sum (x - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

معامل التفرطح للتوزيع المعتدل = ٣

" " " المفرطح > ٣

" " " المدبب < ٣



شكل (٦-٧) أشكال التوزيعات التكرارية من حيث التفرطح.

مثال : أحسب قيم المدلولات التى يمكن منها تقييم نتائج مقاومة الضغط للمجموعات التالية
من عينات الخرسانة : المجموعة الأولى (٤١٠ - ٤١٢ - ٣٩٥ - ٤١٥ كج/سم٢)
المجموعة الثانية (٣٨٥ - ٤٠٢ - ٣٠٥ - ٥٤٠ كج/سم٢)
ثم احسب قيمة المقاومة التى تحقق درجة ثقة ٩٠٪ بالنسبة للمجموعة الثانية.

الحـــــــل

	المجموعة الأولى	المجموعة الثانية
المفردات مرتبة	٣٩٥ ، ٤١٠ ، ٤١٢ ، ٤١٥	٣٠٥ ، ٣٨٥ ، ٤٠٢ ، ٥٤٠
المتوسط كج/سم٢	٤٠٨	٤٠٨
المدى كج/سم٢	٢٠ (٤,٩% من المتوسط)	٢٣٥ (٥٧,٦% من المتوسط)
الإنحرافات كج/سم٢	- ١٣، +٢ ، +٤ ، +٧	-١٠٣ ، -٢٣ ، -٦ ، ١٣٢
الإنحراف المعيارى كج/سم٢	٧,٧	٨٤,٦
معامل الإختلاف %	١,٩	٢٠,٧
درجة التحكم فى الجودة	ممتازة	رديئة
المقاومة المميزة كج/سم٢	٣٩٥	٢٦٩

القيمة التى تعطى درجة ثقة ٩٠% فى المجموعة الثانية:

$$f_{cu} = f_m (1 - kv) = 408 (1 - 1.28 * 0.207) \cong 300 \ kg/cm^2$$

****

٦-٨ توزيع البيانات

إذا كان عندنا مجموعة من البيانات كثيرة العدد نسبياً ومطلوب إستخلاص المدلولات الفنية والحكم على هذه المجموعة ومدى تجانسها فإنه يمكن توزيعها على هيئة شرائح أو فئات بإتباع الخطوات الآتية:

١- نوجد المدى الذى يقع داخلة جميع القراءات (المدى = أكبر قيمة - أقل قيمة)
٢- نحدد عرض الشريحة الذى يجعل عدد الشرائح دائما = ١٠ ± ٢

عدد الشرائح = $\frac{\text{المدى}}{\text{عرض الشريحة}}$ + ١	أو عرض الشريحة = $\frac{\text{المدى}}{\text{عدد الشرائح - ١}}$

مثال: إذا كان المدى = ١٦٠ كج/سم^{٢} فإن عرض الشريحة = ١٦٠ ÷ (عدد الشرائح - ١)
إذن ممكن نأخذ عدد الشرائح = ٩ وعرضها ٢٠ كج/سم^{٢}
أو نأخذ عدد الشرائح = ١١ وعرضها ١٦ كج/سم^{٢}

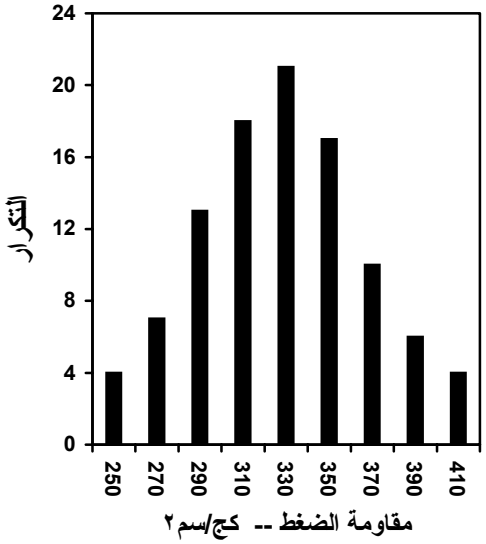
أما إذا كان المدى = ١٦٣ كج/سم٢ ففى هذه الحالة يمكننا توزيع الـ ٣ فى أول شريحة وآخر شريحة بمعنى أننا عندنا شريحة زيادة دائما لمثل هذه الفروق (نضع نصف شريحة فى الأول ونصف شريحة فى النهاية) وسنرى ذلك فى مثال شامل فيما بعد.

٣- نعمل جدول مختصر وفية نضع جميع الأرقام على صورة شرائح أو فئات

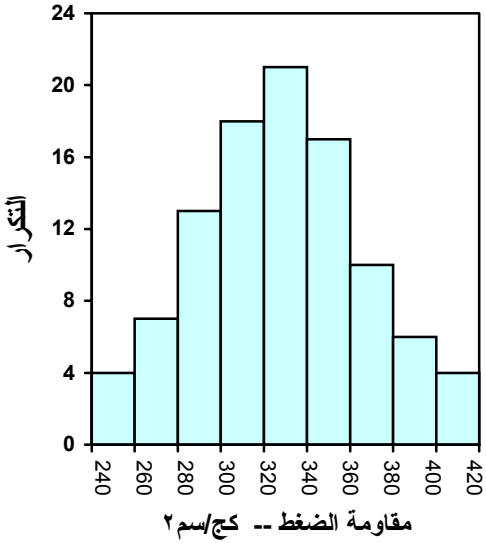
رقم الشريحة	حدود الشريحة	المتوسط	التكرار
١	٢٤٥ - ٢٥٥	٢٥٠	٤
٢	٢٥٥ - ٢٦٥	٢٦٠	٦
:	:	:	:
:	:	:	:
٩	٣٢٥ - ٣٣٥	٣٣٠	٢

٤- يترجم الجدول السابق إلى الرسومات البيانية الآتية:

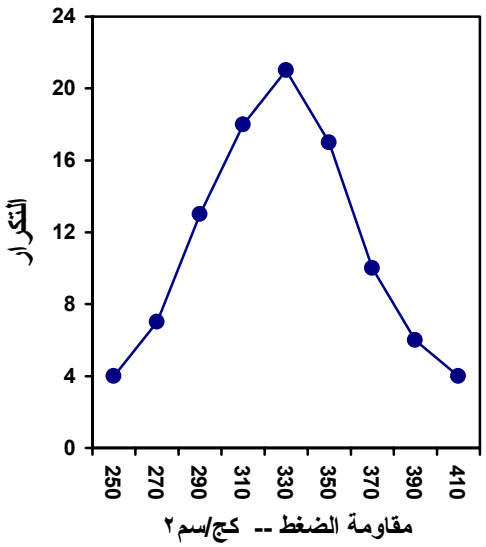
أ - لوحة قضبان التكرار (بين المتوسط والتكرار)
ب- مضلع التكرار أو المنحنى التكرارى (,, ,, ,,)
ج- هيستوجرام التكرار (بين حدود الشريحة والتكرار)
د- المنحنى التكرارى التجميعى (,, ,, ,, ,, ,,)



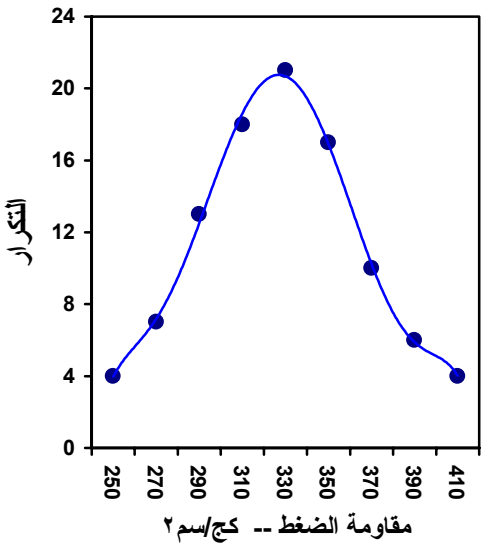
أ- لوحة قضبان التكرار



ب- هيستوجرام التكرار

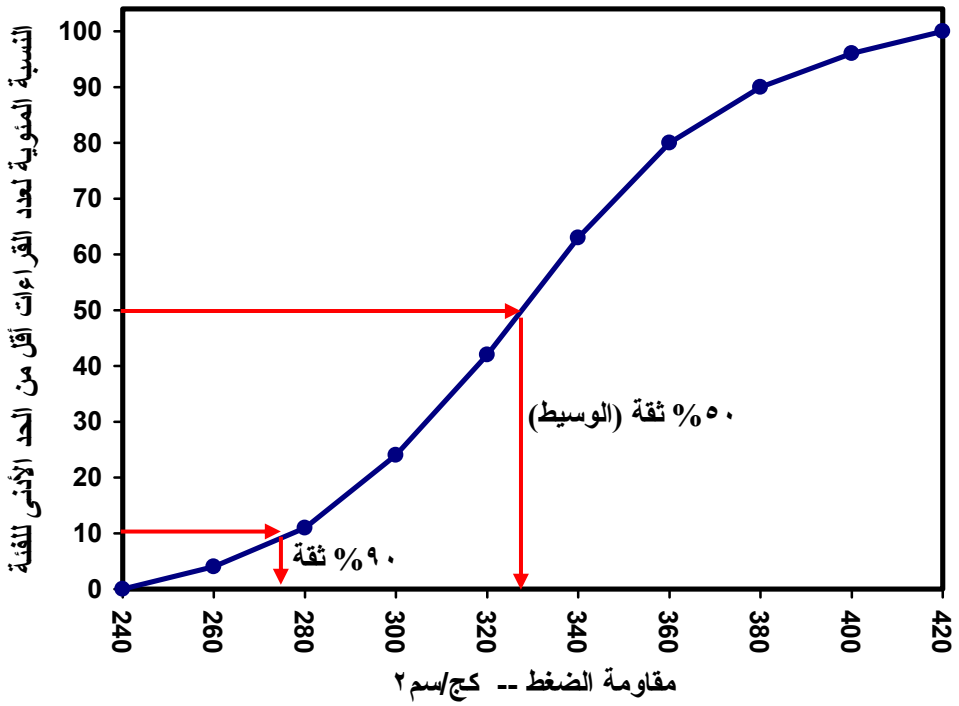


ج- مضلع التكـــرار



د- المنحنى التكـــراري

شكل (٦-٨) الأشكال البيانية المختلفة للتوزيعات التكرارية.



شكل (٦-٩) المنحنى التكرارى التجميعى.

مثال: إذا كان لدينا عدد ٢٥٠ قراءة لمقاومة الضغط وكان أقل القراءات هو ٢٥١ كج/سم٢ وأكبرها ٣٤٨ كج/سم٢ حدد عدد الشرائح المناسب وحدود أول شريحة وآخر شريحة حتى يمكننا تحليلها إحصائيا.

الحـــــل

$$\text{عدد الشرائح} = \frac{\text{المـــدى}}{\text{عرض الشريحة}} + ١$$

المدى = ٣٤٨ - ٢٥١ = ٩٧ كج/سم٢

هنا نفترض جدلاً أن المدى = ١٠٠ بدلاً من ٩٧ وذلك فى حالة تنظيم الشرائح فقط .

بمعنى أن المدى = (٣٥٠-٢٥٠) بحيث نضع أى فرق فى نصف الشريحة الأولى ونصف الشريحة الأخيرة.

$$\text{عدد الشرائح} = \frac{١٠٠}{\text{عرض الشريحة}} + ١$$

∴ نأخذ عرض الشريحة = ١٠ كج/سم٢ والعدد = ١١ شريحة

- بداية أول شريحة = أصغر قيمة (مفترضة) - نصف عرض شريحة
= ٢٥٠ - ٥ = ٢٤٥ كج/سم^{٢}
∴ حدود الشريحة الأولى = ٢٤٥ إلى ٢٥٥

- نهاية الشريحة الأخيرة = أكبر قيمة (مفترضة) + نصف عرض شريحة
= ٣٥٠ + ٥ = ٣٥٥ كج/سم^{٢}
∴ حدود الشريحة الأخيرة = ٣٤٥ إلى ٣٥٥

****

مثال: لضبط جودة خرسانة صهريج مياه أخذت عينات من الخرسانة أثناء مراحل التنفيذ وإختبرت مقاومة الضغط للعينات القياسية فكانت وفقا للجدول الآتى:

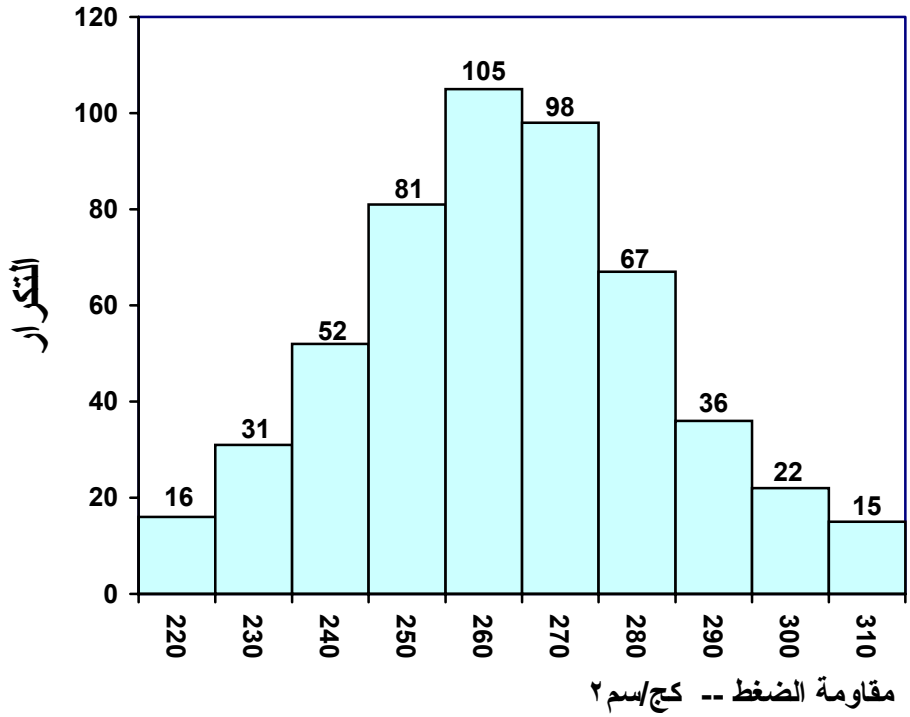
رقم الفئة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠
حدود الفئة كج/سم^{٢}	٢١٥ ٢٢٥	٢٢٥ ٢٣٥	٢٣٥ ٢٤٥	٢٤٥ ٢٥٥	٢٥٥ ٢٦٥	٢٦٥ ٢٧٥	٢٧٥ ٢٨٥	٢٨٥ ٢٩٥	٢٩٥ ٣٠٥	٣٠٥ ٣١٥
التكـــرار	١٦	٣١	٥٢	٨١	١٠٥	٩٨	٦٧	٣٦	٢٢	١٥

إرسم كلاً من هيستوجرام التكرار ومنحنى التكرار التجميعى ومنحنى التوزيع التكرارى ثم إستخلص المدلولات التى يمكن منها معرفة مستوى إنتاج هذه الخرسانة ومدى إنتظامها ودرجة جودتها. إحسب أيضا قيمة المقاومة عند درجة ثقة ٩٠% ، ٩٥%.

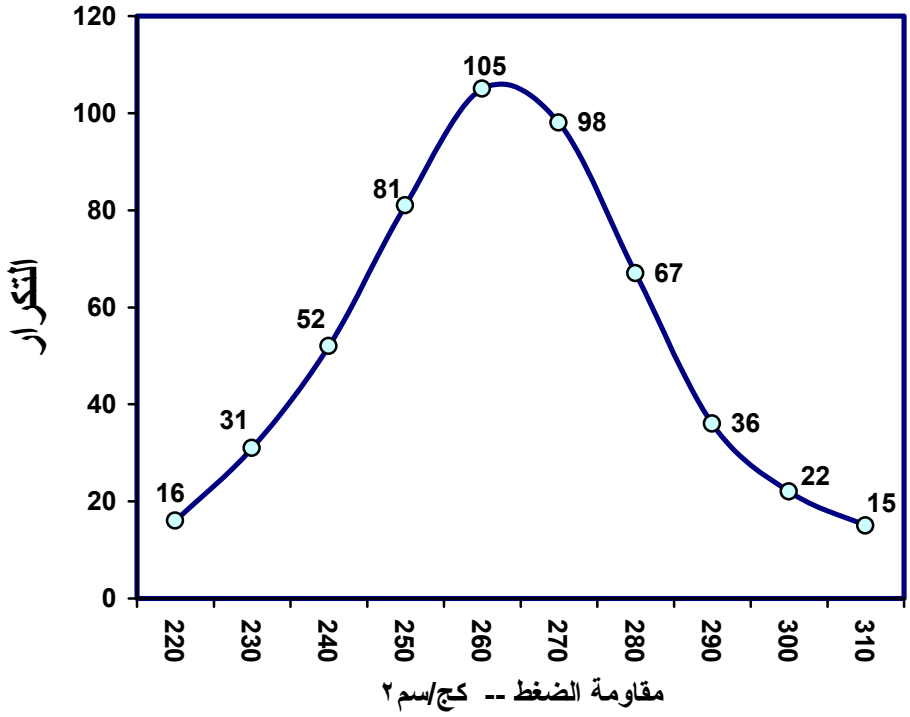
الحـــــل

أولاً نكون الجدول الآتى:

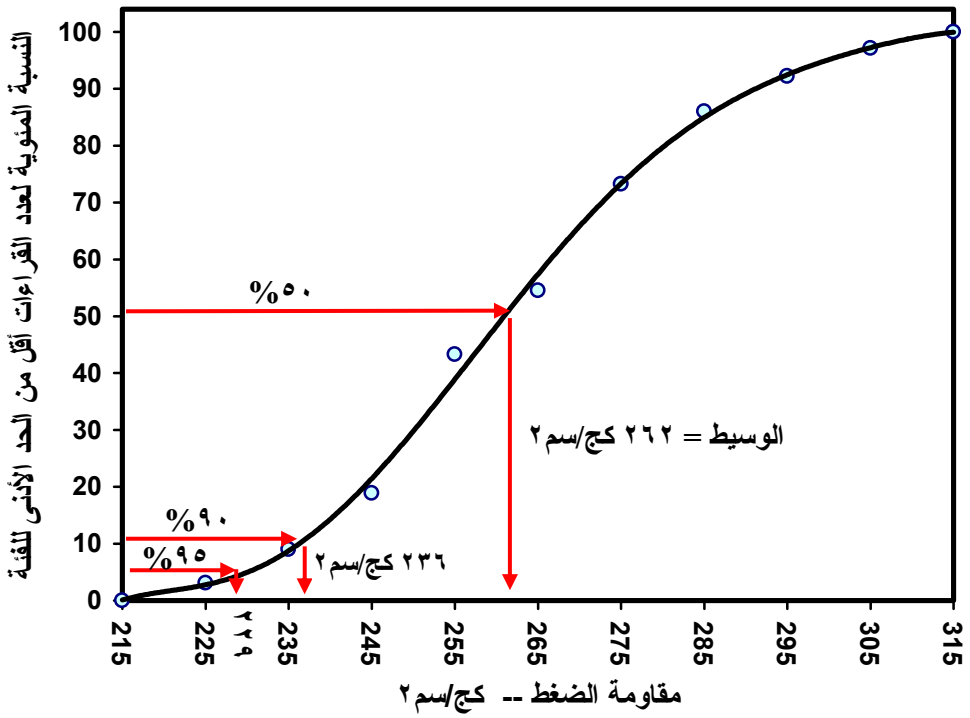
الحد الأدنى للشريحة	٢١٥	٢٢٥	٢٣٥	٢٤٥	٢٥٥	٢٦٥	٢٧٥	٢٨٥	٢٩٥	٣٠٥	٣١٥
عدد القراءات أقل من الحد الأدنى	صفر	١٦	٤٧	٩٩	١٨٠	٢٨٥	٣٨٣	٤٥٠	٤٨٦	٥٠٨	٥٢٣
عدد القراءات %	صفر	٣,١	٩	١٨,٩	٤٣,٣	٥٤,٥	٧٣,٢	٨٦,٠	٩٢,٢	٩٧,١	١٠٠



هيستوجرام التكرار



المنحنى التكراري.



منحنى التوزيع التكراري التجميعى.

ثانياً مقاييس المركزية:

١- المتوسط $\overline{X} = \frac{\sum nx}{N}$

حيث X **متوسط الفئة**
n **تكرار الفئة**
N **العدد الكلى للعينات**

$$= \frac{220x16 + 230x31 + \ldots\ldots\ldots\ldots + 310x15}{523} = ٢٦٣,٠٨ \text{ كج/ سم}^٢$$

٢- الوسيط = ٢٦٢ كج/سم٢ (من منحنى التكرار التجميعى)

٣- المنوال = ٢٦٠ كج/سم٢ (من جدول التكرار أو هيستوجرام التكرار)

ومن هنا يتضح أن المنحنى موجب الإلتواء حيث أنه يميل قليلاً جداً ناحية القيم الأقل من المتوسط.

ثالثاً مقاييس التشتت:

١- الانحراف المعيارى $\sigma = \sqrt{\frac{\sum n(x-\bar{x})^2}{N-1}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{16(220-263.8)^2+31(230-263.8)^2+.....+15(310-263.8)^2}{523-1}} = 20.5 \text{ kg/cm}^2$$

٢- معامل الإختلاف = الانحراف المعياري / المتوسط = ٢٠,٥ × ١٠٠ / ٢٦٣,٠٨ = ٧,٧٩ %

إذن طبقا لتقييم ACI فإن التحكم فى ضبط الجودة ممتاز

رابعاً حساب قيمة المقاومة التى تعطى درجة ثقة معينة تحليليا وبيانيا:

أ- تحليلياً:

- درجة ثقة ٩٠%

$f_{cu} = f_m (1 - kv) = 263.08 (1 - 1.28 * 0.0779) = 236.85 \text{ kg/cm}^2$

- درجة ثقة ٩٥%

$f_{cu} = f_m (1 - kv) = 263.08 (1 - 1.64 * 0.0779) = 229.47 \text{ kg/cm}^2$

ب- بيانياً:

من منحنى التكرار التجميعى

f_{cu} (90%) ≅ 236 kg/cm^2

f_{cu} (95%) ≅ 229 kg/cm^2

وبصفه عامة فإنة طبقا للتقييم بكل من σ ، v فإن درجة التحكم فى الجودة تعتبر ممتازة حيث الإنحراف المعيارى (σ) أقل من ٢٨ كج/سم٢ و معامل الإنحراف (v) أقل من ١٠%.

أما عن مدى إنتظام النتائج فيوجد التواء خفيف جداً فى المنحنى ناحية القيم الأقل من المتوسط.

****

الباب السابع

خواص و إختبارات الخرسانة الطازجة

Properties and Testing of Fresh Concrete

٧–١ مقدمة Introduction

تمر الخرسانة من لحظة إضافة الماء لها وحتى إنتهاء عمرها الإفتراضى بالمراحل الثلاثة الآتية:

أ- الخرسانة الطازجة Fresh Concrete

وهى الخرسانة التى تبدأ من لحظة إضافة الماء إلى مكونات الخرسانة الجافة وحتى لحظة حدوث زمن الشك الإبتدائى. وتمتاز هذه المرحلة بالقدرة على الخلط والنقل والصب.

ب- الخرسانة الخضراء Green Concrete

وهى الخرسانة المتكونة فى الفترة من بداية شك الأسمنت وحتى بداية تصلد الخرسانة أى فى حدود ٢٤ ساعة. وفى هذه المرحلة لا يُسمح للخرسانة بالخلط والنقل والصب لأنها تكون قد شكت كما إنها لا تقوى على تحمل أى نوع من الإجهادات.

ج- الخرسانة المتصلدة Hardened Concrete

وهى تبدأ بتصلد الخرسانة (أى عند عمر ٢٤ ساعة) وحتى نهاية عمرها الإفتراضى وتمتاز هذه المرحلة بأنها بداية زيادة المقاومة الرئيسية للخرسانة (مقاومة الضغط) وقدرتها على مقاومة الأحمال بمرور الزمن.

وتتوقف خواص الخرسانة على التركيب البنائى لها والذى بدوره يتوقف على نوع المواد المكونة للخرسانة وكميتها وكذلك النسب بينها وأيضاً مدى تجانس هذه المواد وتوزيعها وكيفية تماسكها مع بعضها وكذلك تتوقف خواص الخرسانة أيضاً على الظروف التى تتم فيها عملية تصلد الخرسانة. كما تتوقف جودة الخرسانة أيضاً على بعض خواص الخلطة الخرسانية والتى تجعلها قابلة للتشغيل والتشكيل والصب والدمك بأقل جهد ممكن. وبصفة عامة فإن خواص الخرسانة وهى فى حالتيها الطازجة والمتصلدة يجب أن تحقق المواصفات والشروط الخاصة لكل نوع من الخرسانة على حده.

٧-٢ تحضير عينات اختبارات الخرسانة الطازجة

يجب أن تكون العينة الكلية المأخوذة من الخرسانة الطازجة ممثلة تماماً للخلطة كما يجب أن لا يقل حجمها عن ٣٠ لتر (٠,٠٣ متر مكعب) وتتكون هذه العينة من كميات مأخوذة من أماكن متفرقة من الخلطة. وتحضر العينة من الخلطة المجهزة فيموقع العمل Job site بالخلط اليدوي أو من الخلطة المجهزة بالخلاط الميكانيكى - وفى الحالة الأولى تجمع أجزاء العينة الكلية من أماكن متفرقة موزعة توزيعاً منتظماً فى الخلطة مع تجنب حروف الخلطة حيث يحتمل تواجد الإنفصال الحبيبى للخرسانة Segregation. أما فى حالة الخرسانة المخلوطة خلطاً ميكانيكيا فيفرغ الخلاط على دفعات متساوية تقريبا وتحضر أجزاء العينة من ثلاث كميات على الأقل تؤخذ أثناء تفريغ الخلاطة.

وتنقل العينة بعد ذلك إلى مكان الإختبار وتخلط خلطاً تاما على سطح غيرمنفذ للماء بجاروف أو مايماثله لضمان تجانسها وبذلك تكون العينة معدة للإختبار مباشرة. ويجب مراعاة حماية عينة الإختبار من التأثيرات الجوية مثل الشمس والرياح والأمطار والأتربة وذلك فى الفترة بين تحضير العينة وإجراء الإختبارات التى يجب أن لا تزيد عن ١٥ دقيقة ويراعى أن تسجل مع كل عينة البيانات التالية:

- تاريخ ووقت أخذ عينة الإختبار.
- الطريقة المستخدمة فى خلط الخرسانة.
- نسب مكونات المواد المكونة لخلطة الخرسانة.
- مكان الخلط.
- درجة الحرارة والظروف الجوية.

ويلاحظ أن خواص الخرسانة الطازجة المطلوبة لمنشأ خرسانى معين تحدد طبقا لطبيعة المنشأ وكذلك أبعاد القطاعات الخرسانية وكثافة أسياخ التسليح وتكنولوجيا تصنيع الخرسانة من حيث طريقة الخلط والنقل والصب والدمك والمعالجة.

٧-٣ الخواص الرئيسية للخرسانة الطازجة

للخرسانة الطازجة أربعة خواص رئيسية هى:

١- **قوام الخلطة الخرسانية** Consistency
٢- **قابلية التشغيل** Workability
٣- **الإنفصال الحبيبى** Segregation
٤- **النزيف (النضح)** Bleeding

١- القـــوام Consistency

❐ تعريف القـوام:

- يعبر قوام الخرسانة الطازجة عن درجة بلل الخرسانة Degree of Wetness فمثلاً يقال خرسانة جافة القوام Dry أو صلبة القوام Stiff أو لدنة القوام Plastic أو مبتلة القوام Wet أو رخوة القوام Sloppy.

- ويمكن القول بأن قوام الخرسانة يعبر عن السيولة النسبية للخرسانة Relative Fluidity أى أنه يبين النسبة بين كمية ماء الخلط وكمية المواد الجافة بالخرسانة.

❐ الغرض من تحديد القوام:

هو ضمان الحصول على خرسانة ذات درجة سيولة أو لدونة تتناسب مع مختلف الأعمال الإنشائية. كما أنه من أهم وأبسط الخواص التى تساعد على التأكد من إنتظامية خلطات الخرسانة الطازجة وتجانسها وضبط جودتها وذلك قبل الصب مباشرة.

❐ العوامل التى تؤثر على القوام:

- نسبة مكونات الخرسانة: من ماء ورمل وزلط وأسمنت حيث يزداد الهبوط بزيادة محتوى الماء فى الخلطة. أو بزيادة نسبة الأسمنت. أو لصغر نسبة الرمل إلى الزلط (أنظر شكل ٧-١).

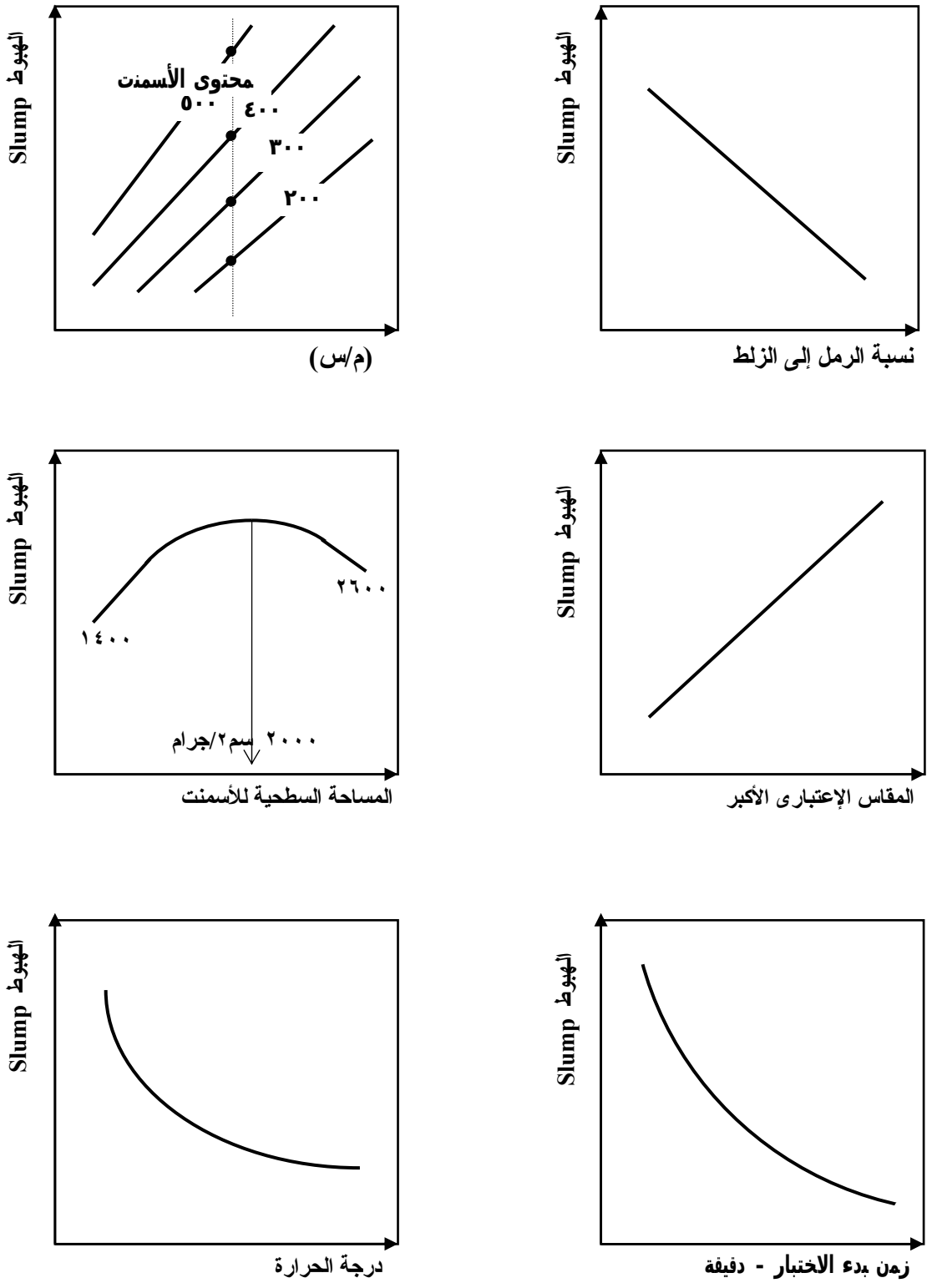
- نعومة الأسمنت (المساحة السطحية للأسمنت) حيث يزداد الهبوط بزيادة المساحة السطحية للأسمنت وحتى حوالى ٢٠٠٠ سم^{٢}/جم ثم تقل بعد ذلك بشرط ثبوت جميع العوامل الأخرى فى الخلطة الخرسانية كما هو مبين بالمنحنى شكل (٧-١).

- المقاس الإعتبارى الأكبر للركام حيث يزداد الهبوط بزيادة ذلك المقاس ويقل كلما صغر حجم الحبيبات.

- الزمن بين الإنتهاء من خلط الخرسانة وبين إجراء إختبار الهبوط حيث يقل الهبوط بزيادة ذلك الزمن كما بشكل (٧-١).

- حرارة الجـو: حيث يقل الهبوط كلما زادت حرارة الجو (نتيجة تبخر جزء من ماء الخلط).

- الإضافات: تعمل الإضافات على تحسين قوام الخرسانة بدرجات متفاوته وأهم هذه الإضافات الملدنات Superplasticizers هى مواد سائلة تضاف إلى الخلطة بنسبة ١ - ٣% من وزن الأسمنت.



شكل (٧-١) العوامل التى تؤثر على قوام الخرسانة.

❐ طرق تعيين القوام:

يوجد ثلاثة طرق رئيسية لتعيين قوام لخرسانة هى:

* هبوط الخرسانة بعد إزالة قالب التشغيل Slump Test.
* إنسياب الخرسانة الطازجة بعد تعرضها لإهتزازات ترددية Flow Test.
* اختراق جسم معدني للخرسانة تحت تأثير وزنة Ball Penetration Test.

أولاً: اختبار الهبوط Slump Test

- الغرض من الاختبار: تحديد قوام الخلطة الخرسانية بتعيين مدى هبوطها بعد تشكيلها على هيئة مخروط ناقص وذلك إما فى المعمل أو فى موقع التنفيذ. وذلك للتأكد من نسب مكونات الخلطة الخرسانية حيث أن أي تغيير فى نسبة الأسمنت أو كمية الماء والركام يؤثر على قيمة الهبوط. ويعتبر هذا الاختبار من أبسط وأفضل الوسائل لضبط الجودة فى محطات الخلط وفى مواقع التنفيذ.

- قالب الإختبار: عبارة عن مخروط ناقص ومصنوع من معدن متين بسمك ١,٥ مم على الأقل مفتوح من أعلى ومن أسفل ، قطر فتحته العليا ١٠ سم والسفلى ٢٠سم وإرتفاعه ٣٠ سم كما بشكل (٧-٢).

- قضيب الدمك: وهو سيخ من الصلب بقطر ١٥مم وطول ٦٠ سم.

شكل (٧-٢) قالب اختبار الهبوط وقضيب الدمك.

- طريقة إجراء الاختبار:

- ينظف السطح الداخلى للقالب بحيث لا توجد به أى مياه عالقة أو آثار خرسانية.
- يوضع القالب على سطح أفقى أملس غير مُنفذ للماء على أن يثبت جيداً.
- يملأ القالب على ثلاث طبقات إرتفاع كل منها يساوى ثلث إرتفاع القالب تقريبا على أن تدمك كل طبقة بواسطة قضيب الدمك ٢٥ مرة موزعه تقريبا على السطح وبشرط أن ينفذ القضيب إلى الطبقة التى تحتها.
- بعد الانتهاء من دمك الطبقة العليا للقالب يسوى سطحها مع حافة القالب.
- يرفع القالب بعد ملئة مباشرة فى إتجاه رأسى وببطء وعناية كما بشكل (٧-٣).
- يقاس مقدار الهبوط Slump بعد رفع القالب مباشرة وهو الفرق بين إرتفاع القالب وإرتفاع مركز عينة الخرسانة الطازجة كما بشكل (٧-٤). يتم توصيف القوام إما جاف أو صلب أو لدن أو مبتل أو رخو وذلك طبقاً لقيمة الهبوط كما هو موضح بجدول (٧-١).
أما جدول (٧-٢) فيوضح قيم استرشادية للقوام ودرجة الدمك فى بعض الإنشاءات المختلفة.

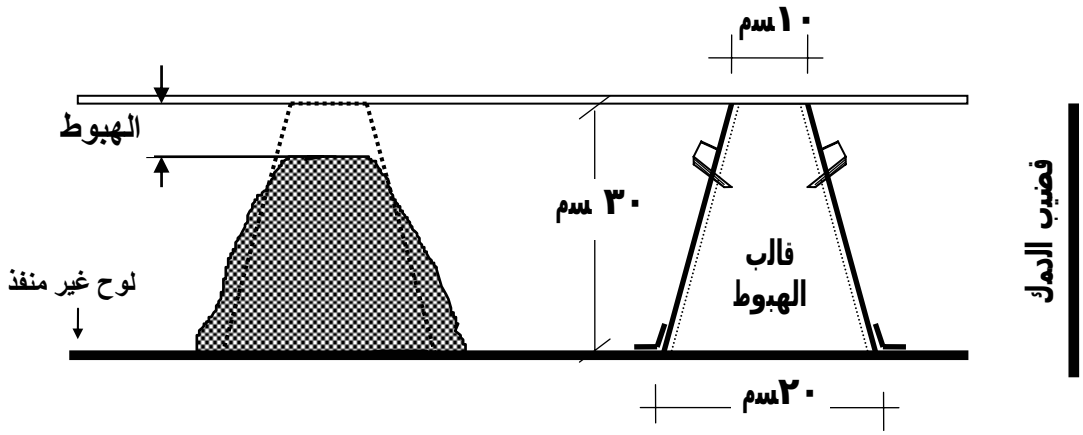
ملاحظـــات:

- يجب أن لا يزيد المقاس الإعتبارى الأكبر للركام المستخدم عن ٤٠ مم.
- يجب أن لا تزيد الفترة بين إنتهاء الخلط وبداية إجراء الإختبار عن دقيقتين.
- تحدث ثلاثة أشكال مختلفة لحالة الهبوط فقد يكون هبوطاً حقيقياً True Slump أو هبوط قصShear Slump أو إنهيار Collapse كما بشكلى (٧-٥) و (٧-٦).
- يراعى اعادة الإختبار على عينة أخرى فىحالة حدوث إنزلاق جانب Slipping فى العينة أو إنهيار .Collapse إذا تكرر ذلك فى حالة إعادة الإختبار فيقاس الهبوط مع تسجيل ذلك مع النتيجة.

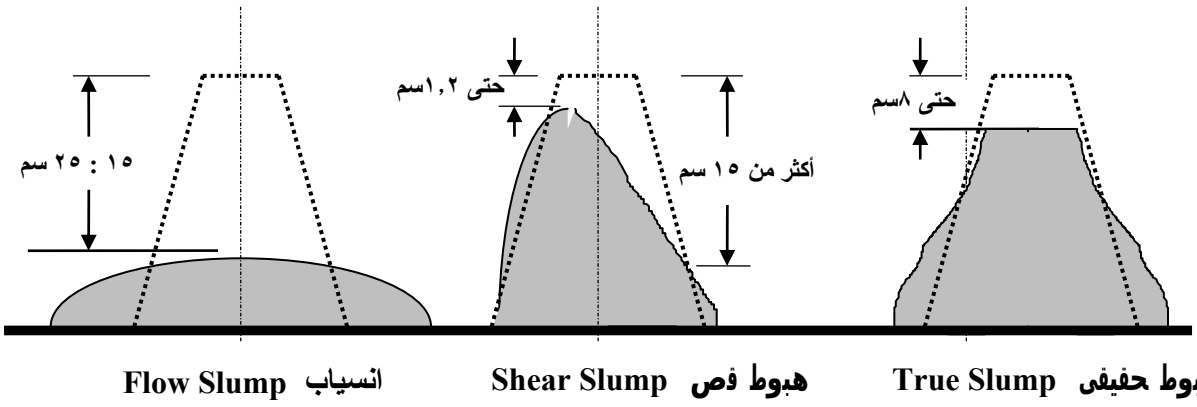
جدول (٧-١) قيم الهبوط المناظرة لدرجات قوام الخرسانة المختلفة.

الهبوط (مم)	صفر-٢٠	١٠-٤٠	٣٠-١٢٠	١٠٠-٢٠٠	١٨٠-٢٢٠
قوام الخلطة الخرسانية Consistency	جاف Dry	صلب Stiff	لدن Plastic	مبتل Wet	رخو Sloppy

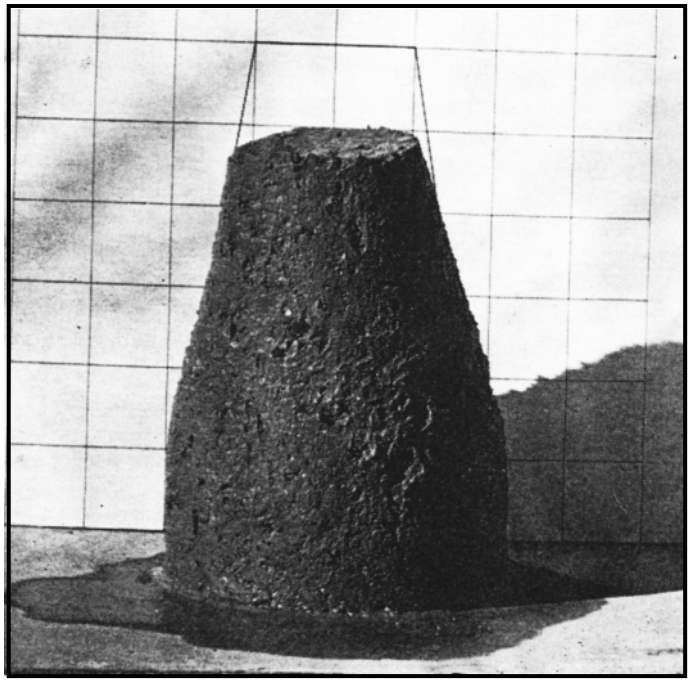
شكل (٧–٣) رفع القالب بعد ملئه فى إتجاه رأسى.



شكل (٧–٤) قياس الهبوط لتحديد قوام الخرسانة الطازجة.



شكل (٧-٥) أشكال الهبوط المختلفة.

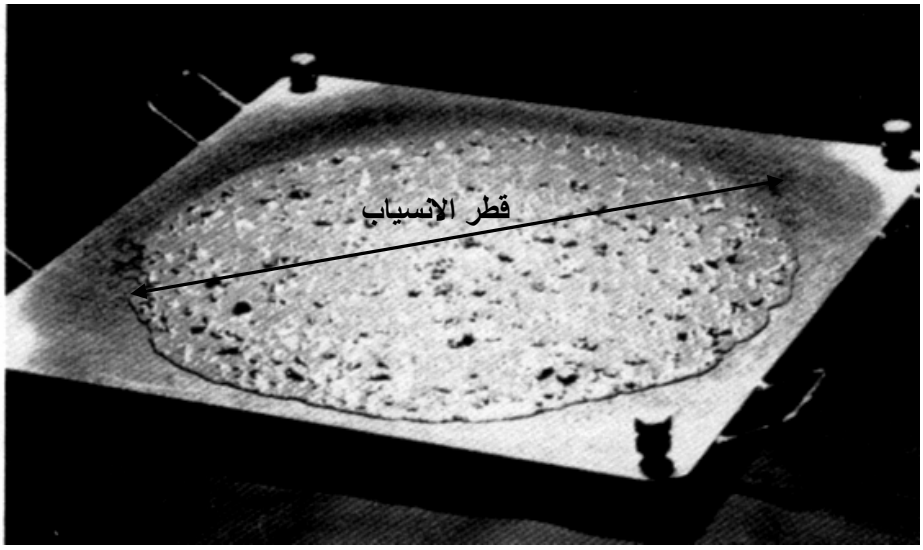


شكل (٧-٦) نموذج للهبوط الحقيقى.

جدول (٧-٢) القوام ومحتوى الأسمنت ومقاس الركام المناسب للأنواع المختلفة من الإنشاءات.

نوع العنصر الإنشائي	درجة الدمك	الهبوط (مم)
خرسانة كتلية.	دمك ميكانيكي	صفر- ٢٥
القواعد الخرسانية خفيفة التسليح ومتوسطة التسليح. قطاعات خرسانية خفيفة التسليح.	دمك ميكانيكي	٢٥ : ٥٠
قطاعات خرسانية متوسطة وعالية التسليح. قطاعات خرسانية خفيفة التسليح.	دمك ميكانيكي دمك يدوي	٥٠ : ١٠٠
قطاعات خرسانية كثيفة التسليح.	دمك خفيف	١٠٠ : ١٢٥
أساسات عميقة وخرسانة قابلة للضخ مع استخدام إضافات كيميائية (ملدنات أو ملدنات فائقة)	دمك خفيف	١٢٥ : ٢٠٠

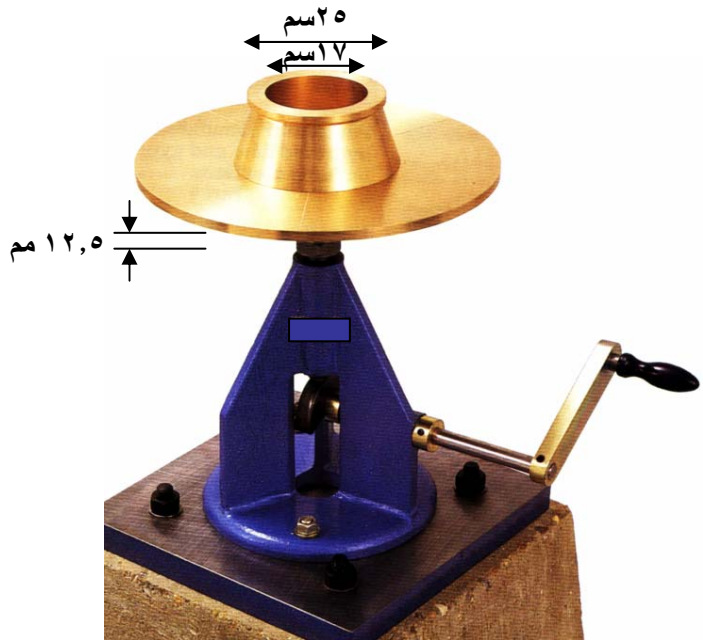
و تجدر الإشارة أنه فى حالة الخرسانة ذات درجة السيولة العالية أو التى يزيد فيها الهبوط عن ٢٢ سم مثل الخرسانة ذاتية الدمك فإنه يتم قياس انسياب الهبوط وهو القطر المتوسط للخرسانة المنسابة بعد رفع مخروط الهبوط. وفى الخرسانة ذاتية الدمك فيشترط أن لا يقل انسياب الهبوط عن ٦٠ : ٧٠ سم كما بشكل (٧-٧).



شكل (٧-٧) انسياب الهبوط فى الخرسانة ذاتية الدمك.

ثانياً : اختبار الانسياب Flow Test

يختص هذا الاختبار بتعيين النسبة المئوية لانسياب الخرسانة والتى تُعبر عن حالة القوام وذلك بإجراء إهتزاز ترددى لمخروط ناقص من الخرسانة موضوع على لوح معدنى وتسجيل مدى إنتشار أو انسياب الخرسانة كنسبة مئوية من القطر الأصلي لقاعدة المخروط.



شكل (٧-٨) جهاز الإنسياب لتحديد القوام.

الأجهزة :

- قالب الإختبار : وهو عبارة عن قالب معدنى على شكل مخروط ناقص ويكون هذا القالب مفتوحاً من أعلى ومن أسفل بمستويين عموديين على محور المخروط.
- قرص الإنسياب (Flow Table) ويثبت القرص على قاعدة جاسئة بإرتفاع من ٤٠-٥٠ سم بوزن ١٥ كج على الأقل.

طريقة إجراء الإختبار:

١- ينظف القرص جيداً بالماء ثم يجفف بعناية حيث لا يبقى به أثر لماء التنظيف.

٢- يوضع القالب مثبتاً فى وسط القرص وذلك بالضغط على مقبضية باليد.

٣- يُملأ القالب على طبقتين إرتفاع كل منهما يساوى نصف الإرتفاع تقريبا على أن تدمك كل طبقة بواسطة قضيب الدمك القياسى ٢٥ مرة موزعة تقريبا بالتساوى على سطح المقطع المستعرض للقالب بشرط أن يَنفُذ القضيب إلى الطبقة التى تليها (يراعى أن يكون نصف عدد ضربات الدمك فى إتجاه مائل إلى الخارج والنصف الثانى فى إتجاه رأسى).

٤- بعد الانتهاء من دمك الخرسانة للطبقة العليا للقالب يسوى سطحها مع حافة القالب بالمسطرين مع مراعاة ملء القالب تماما.

٥- تُزال الخرسانة الزائدة التىسقطت على قرص الإختبار عند تسوية السطح ثم ينظف جيداً حول قالب الإختبار.

٦- يُرفع القالب المعدنى بعد ملئه مباشرة من الخرسانة بإنتظام فى إتجاه رأسى.

٧- يُرفع القرص ويخفض بمعدل منتظم لمسافة ١٢,٥ مم (٢/١ بوصة) وذلك ١٥ مرة فى مدى حوالى ١٥ ثانية.

٨- تقاس قاعدة الخرسانة المنسابة نتيجة الرفع والخفض المذكورة ويكون القياس لقطر القاعدة فى ٦ إتجاهات مختلفة ثم يؤخذ متوسط هذه القراءات ليمثل قطر الإنسياب لقاعدة المخروط الخرسانى بعد إنسياب الخرسانة.

٩- تحسب النسبة المئوية لإنسياب الخرسانة (لأقرب ٥ مم) بإعتبارها النسبة المئوية لزيادة قطر الإنسياب عن قطر القاعدة الأصلى كمايلى:

$$\text{النسبة المئوية للإنسياب} = \frac{\text{قطر الإنسياب (سم)} - ٢٥}{٢٥} \times ١٠٠$$

(حيث أن قطر القاعدة الأصلى للمخروط الخرسانى يساوى ٢٥ سم)

ويعتبر اختيار الإنسياب اختبارا معملياً فى معظم الحالات نظراً لعدم سهولة تواجد الجهاز فى موقع العمل. ويمثل الجدول الآتى النسب المئوية للإنسياب عند درجات القوام المختلفة.

جدول (٧-٣) العلاقة بين قوام الخلطة والإنسياب.

النسبة المئوية للانسياب	صفر-٢٠%	١٥-٦٠%	٥٠-١٠٠%	٩٠-١٢٠%	١١٠-١٥٠%
قوام الخلطة الخرسانية Consistency	جـاف Dry	صلب Stiff	لدن Plastic	مبتل Wet	رخـو Sloppy

ثالثاً: إختبار كرة الإختراق (كيلى) Ball Penetration Test

وهذه الطريقة يحدد بها قوام الخرسانة بيسر ودقة كافيين وهو إختبار مشابه للهابط إلا أنه أسهل منه وأسرع منه. و يتكون الجهاز أساساً من ثقل على شكل نصف كرة نصف قطرها ١٥ سم ووزنها ١٣,٦ كج يتصل بها يد عليها مقياس مدرج والكل ينزلق من فتحة داخل إطار كما فى شكل (٧-٩) ويمكن وضع هذا الإطار على سطح الخرسانة المراد قياس قوامها كما أن هذا الإطار يصلح فىنفس الوقت لإستخدامه كمستوى ثابت للمقارنة وقت الإختبار ويلاحظ أن جميع أجزاء الجهاز تصنع من الصلب أو أى معدن مشابه.

طريقة إجراء الإختبار:

يمكن وضع الخرسانة فى وعاء أو يمكن إجراء الإختبار والخرسانة فى مكانها داخل الفرم بعد صبها مباشرة ، وفى الحالتين يجب ألا يقل سمك الخرسانة عن ١٥ سم وأن يكون لها سطحاً مستوياً بأقل بعد يساوى ٣٠ سم. ويجب جعل سطح الخرسانة مستوياً وناعماً.

يوضع الجهاز بعناية فوق سطح الخرسانة مع رفع اليد إلى أعلى وجعل الإطار يرتكز برفق فوق السطح ثم تترك اليد لتنزلق داخل الإطار. تُقرأ مسافة إختراق الثقل داخل الخرسانة مباشرة على اليد المدرجة لأقرب ٥ مم. يؤخذ متوسط عدة قراءات فى أماكن متفرقة. وتفيد هذه الطريقة فى بيان ومقارنة قوام الخرسانة عند صبها مباشرة داخل الفرم.

شكل (٧-٩) جهاز كرة كيلى لقياس القوام.

٢- القابلية للتشغيل Workability

تعريف:

القابلية للتشغيل هى خاصية الخرسانة الطازجة التى تبين السهولة التى يمكن بها صب ومناولة الخلطة الخرسانية كما تبين درجة تجانسها ومقاومتها للإنفصال الحبيبى.

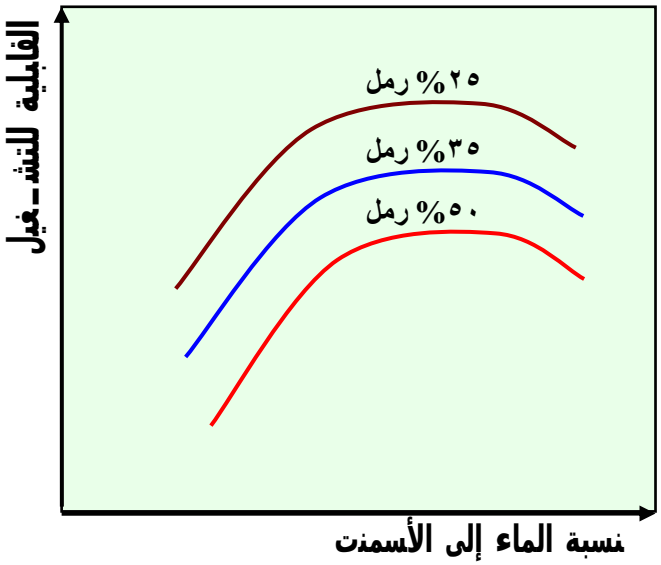
العوامل التى تؤثر على القابلية للتشغيل للخرسانة:

١- الركام:

- مقاس الركام: زيادة نسبة الرمل تزيد من الإحتكاك وبالتالى تزيد صلابة الخلطة (شكل ٧-١٠).
- شكل حبيبات الركام: الحبيبات المدورة أكثر قابلية للتشغيل بينما الحبيبات الزاوية والمفلطحة والغير منتظمة صعبة التشغيل.
- حالة السطح: تقل درجة التشغيل بسبب خشونة السطح مثل حالة الأحجار المكسرة.
- المسامية: تقلل زيادة المسامية من حركة الحبيبات وتزيد من الإحتكاك الداخلى بينها وتقل التشغيلية .
- المقاس الإعتبارى الأكبر: إزدياد حجم الحبيبات يقلل من القابلية للتشغيل وممكن ذلك يكون معتمداً على كيفية صب الخرسانة وطبيعة المنشأ. (أفضل مقاس للخرسانات المسلحة هو ١٥ إلى ٣٠ مم و فى حالة خرسانة الطرق ٥٠ الى ٧٠ مم).

٢- الأسمنت:

- نوعه: حيث تؤثر طرق صناعة الأسمنت على التشغيلية نتيجة تغير درجة التشحيم فى كل نوع.
- نعومته: زيادة نعومة الأسمنت يزيد من درجة تشغيل الخرسانة ولكن تكاليف طحن وتنعيم الأسمنت مكلفة جداً بحيث لا توازى المكسب فى زيادة درجة التشغيل.
- خواص العجينة: نسبة الركام إلى الأسمنت حيث تؤثر هذه النسبة على القابلية للتشغيل بدرجات متفاوته تعتمد على عدة عوامل مختلفة مثل المساحة السطحية ونصف قطر الركام والحجم.



شكل (٧-١٠) تأثير نسبة الركام الصغير فى الركام الشامل على القابلية للتشغيل.

٣- الماء:

فى الخلطات الفقيرة بالأسمنت فإن زيادة الماء لا يؤثر تأثيراً كبيراً على القابلية للتشغيل أما فى الخلطات الغنية فإن زيادة الماء لها تأثير كبير وحساس على القابلية للتشغيل.

٤- نسبة الماء/ الأسمنت:

صغر نسبة م/س تعطى خرسانة جافة وزيادة هذه النسبة لدرجة معينة ينتج عنها خرسانة لها درجة تشغيل أفضل ولكن الزيادة الكبيرة فى نسبة الماء ينتج عنها خرسانة ذات تشغيلية رديئة نظراً لسيولتها كما بشكل (٧-١١).

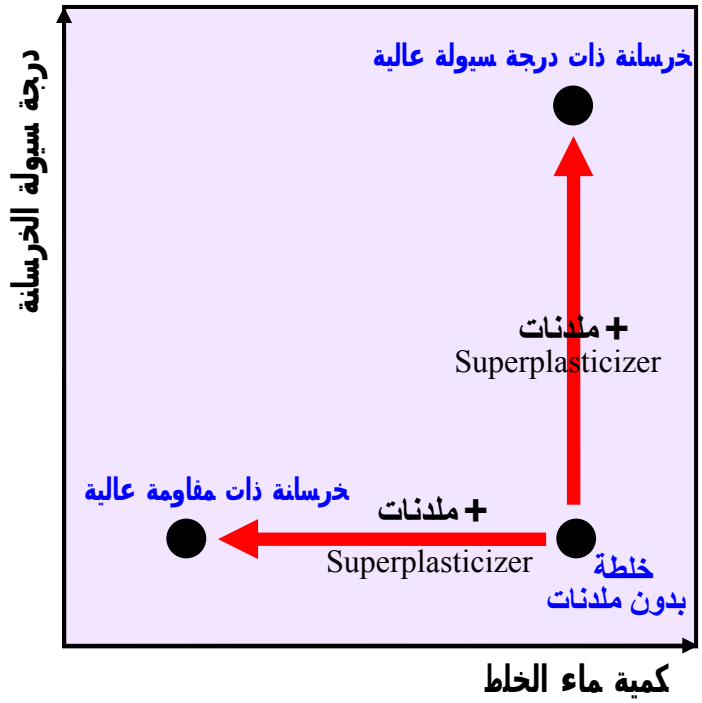
٥- الإضافات:

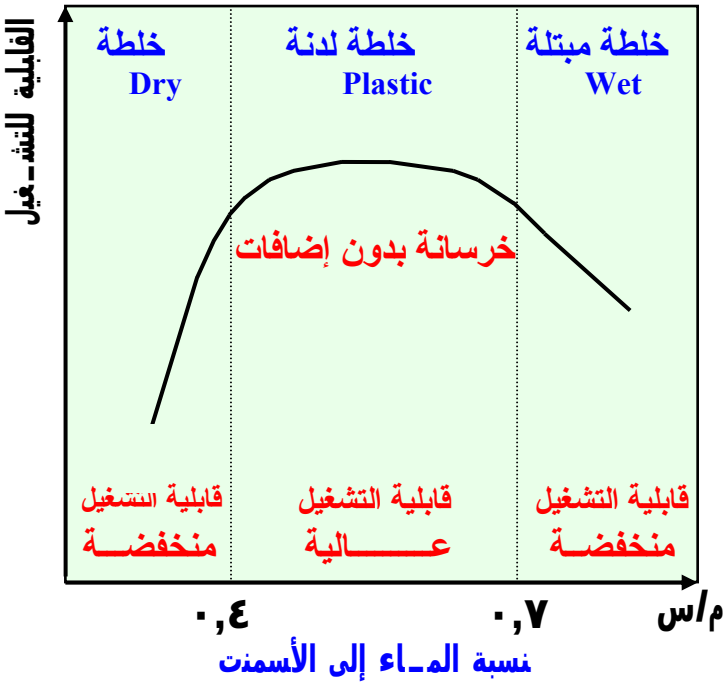
تعمل الإضافات على تحسين درجة التشغيل للخرسانة بدرجات متفاوته وأهم هذه الإضافات هى:

- الملدنات Superplasticizers وهى مواد سائلة تضاف إلى الخلطة بنسب ١: ٣% من وزن الأسمنت.
- مواد مسحوقة ناعما وتعمل على تشحيم الخلطة مثل بودرة الحجر الجيرى.
- مواد جيلاتينية تضاف إلى الخلطة.

٦- الهواء المحبوس:

يعمل الهواء المحبوس فى الخرسانة على تحسين القابلية للتشغيل وذلك إذا كانت نسبتة تتراوح من ٣% إلى ٧%.





شكل (٧-١١) تأثير الإضافات ونسبة الماء فى الخلطة على القابلية للتشغيل.

❐ طرق تعيين القابلية للتشغيل:

يوجد عدة طرق لتعيين قابلية الخرسانة للتشغيل ومن أهم هذه الطرق:

* اختبار عامل الدمك Compacting Factor Test
* طريقة فى بى Vebe (VB) Test

أولاً: إختبار عامل الدمك Compacting Factor Test

يجرى هذا الإختبار لتحديد درجة قابلية تشغيل الخرسانة الطازجة وهذا الإختبار مبنى عل أساس أن الجهد اللازم لدمك الخرسانة يعبر عن مدى القابلية للتشغيل. ويبين الشكل الموضح الجهاز المستخدم فى هذا الإختبار.

طريقة إجراء الإختبار:

- توضع الخلطة الخرسانية فى المخروط العلوى بواسطة الجاروف ويسوى سطحها مع حافة المخروط.
- يفتح الباب الموجود فىأسفل المخروط العلوى بحيث يسمح بهبوط الخرسانة تحت تأثير وزنها فقط إلى المخروط السفلى.
- تكرر نفس الخطوات بالنسبة للمخروط السفلى فتمر الخرسانة إلى الإسطوانة.
- بعد الإنتهاء من ملء الإسطوانة يسوى سطحها وتنظف جوانبها وحوافها الخارجية ثم توزن ويعين وزن الخرسانة المالئة للإسطوانة وهو وزن الخرسانة المدموكه جزئياً = و.
- يعاد ملء الإسطوانة من نفس الخلطة الخرسانية على طبقات على أن تدمك كل طبقة يدوياً أوميكانيكياً حتى تملأ تماما بالخرسانة ثم توزن ويعين وزن الخرسانة المالئة للإسطوانة وهو وزن الخرسانة المدموكة كلياً = ك.

$$\text{عامل الدمك} = \frac{\text{وزن الخرسانة المدموكة جزئياً (نتيجة هبوطها)}}{\text{وزن الخرسانة المدموكة كلياً (نتيجة دمكها)}} = \frac{\text{و}}{\text{ك}}$$

وبمعرفة عامل الدمك يمكن تحديد درجة القابلية للتشغيل كما فى جدول (٧-٤). ويعتبر إختبار عامل الدمك إختباراً معملياً وغيرمناسب لموقع العمل إلا فى المنشآت الكبيرة. وتستخدم هذه الطريقة لقياس قابلية التشغيل لجميع الخلطات الخرسانية بإستثناء الخلطات منخفضة القابلية للتشغيل والخلطات الخشنة لتعذر الحصول على نتائج دقيقة لهذه الخلطات.

شكل (٧-١٢) جهاز عامل الدمك.

جدول (٧-٤) القابلية للتشغيل معبراً عنها بعامل الدمك.

درجة التشغيلية	عامل الدمك	الهبوط (سم)	الإستعمال المناسب للخرسانة.
منخفضة جدا	٠,٧٨	صفر-٢,٥	الطرق المستخدم فيها الهز بالماكينات العادية أو اليدوية
منخفضة	٠,٨٥	٢,٥-٥	الطرق المستخد فيها الهز بالماكينات اليدوية أو الهز اليدوى إذا كان الركام مستديرا أو زاويا. الخرسانة الكتلية فى الأساسات بدون اهتزازات أو الخرسانة المسلحة التى يها تسليح خفيف بواسطة الدمك بالهز.
متوسطة	٠,٩٢	٥-١٠	الأسقف المدموكة باليد أو الخرسانة المسلحة ذات التسليح الثقيل والمدموكة باليد أو بالإهتزازات.
عالية	٠,٩٥	١٠-١٧,٥	للقطاعات ذات التسليح الشديد جداً غير المناسب للهز .

ثانياً : طريقة فى بى Vebe (VB) Test

وهذا الاختبار تعديل لاختبار إعادة التشكيل بحيث ألغيت الإسطوانة الداخلية به وتم الدمك بالهز بدلاً من الرج والشكل (٧-١٤) يوضح رسماً لهذا الجهاز. ويفترض أن إعادة التشكل قد إكتملت عندما يغطى اللوح الزجاجى الخرسانة تماما وعندما تتلاشى كل الفراغات فى الخرسانة ويحدد هذا بالنظر الذى يعتبر أحد عيوب إجراء الإختبار. ويتم الدمك بواسطة منضدة إهتزاز بها حمل غير متمركز ويدور بسرعة ٣٠٠٠ لفة فى الدقيقة وبعجلة قدرها ٣ج إلى ٤ج حيث ج هى عجلة الجاذبية الأرضية. وبفرض أن كمية الطاقة اللازمة لتمام الدمك تمثل درجة التشغيلية للخليط معبراً عنها بالزمن اللازم بالثانية لإعادة التشكل الكامل. وفىبعض الأحيان يعمل تصحيح قدره V2/ V1حيث V2 هو حجم الخرسانة بعد الإهتزاز و V1 هو حجمها قبل الإهتزاز. وهذا الجهاز أميز من جهاز عامل الدمك حيث قد تلتصق بعض الخرسانة الجافة فى القواديس وهو مناسب جداً فى حالة إختبار الخرسانة الجافة أو الخرسانة التى بها ألياف. و قد يستخدم أيضا للتعبير عن القوام.

شكل (٧-١٤) جهاز فى بى.

٣- الانفصال الحبيبي Segregation

الانفصال الحبيبي هو انفصال مكونات أي خليط غير متجانس (مثل الخرسانة) بحيث يصبح توزيع هذه المكونات غير منتظم. ويوجد نوعان من الإنفصال الحبيبى للخرسانة:

١- إنفصال الحبيبات الكبيرة من الركام نتيجة لكونها أكثر ترسباً. وذلك يكون فى الخلطات الجافة جداً وخاصة الفقيرة فى الأسمنت.

٢- إنفصال الأسمنت اللبانى ويحدث ذلك فى الخلطات المبتلة جداً.

❐ أسباب حدوث الانفصال الحبيبى:

١- الخلط: عند زيادة زمن الخلط عن الزمن اللازم والمناسب فقد يحدث إنفصال نتيجة قوة الطرد المركزية لحلة الخلاط والذى ينتج عنه أن الركام الصغير يلتصق بالجدار والكبير يهبط الى أسفل. ولتلافى ذلك يجب عدم زيادة زمن الخلط عن الزمن المحدد لذلك. كذلك يجب عند تفريغ الخلاط أن لا تزيد مسافة التفريغ عن ١,٠ متر.

٢- النقل: عند نقل الخرسانة إلى موضع الصب يمكن حدوث إنفصال نتيجة الرج و التأرجح لعربات النقل وخاصة فى الخلطات المبتلة.

٣- الصب: يجب مراعاة عدم الصب من إرتفاعات عالية.

٤- الدمك: الدمك الزائد قد يسبب إنفصالاً حبيبياً.

❐ لملافاة الانفصال الحبيبى:

١- ينبغى العناية بتصميم الخلطة الخرسانية وضبط مكوناتها عن طريق زيادة المواد الناعمة مثل الأسمنت والركام الصغير وكذلك تقليل نسبة م/س مما يؤدى إلى تماسك أكبر للخلطة الخرسانية.

٢- استخدام إضافات تقليل ماء الخلط Superplasticizers.

٣- مراعاة عمليات الصناعة من خلط و نقل و صب كما سبق شرحه.

٤- استخدام إضافات تحسين اللزوجة Viscosity Enhancing Admixtures.

٤- النضح Bleeding

النضح هو تكون طبقة من الماء على سطح الخرسانة المصبوبة حديثا بعد دمكها و تسويتها.

❐ أسباب حدوث النضح :

كثرة الدمك الذى يؤدى إلى هبوط المكونات الثقيلة (الركام) إلى أسفل وصعود العجينة الأسمنتية إلى أعلا وكذلك زيادة ماء الخلط. وأضرار النضح تتلخص فى الآتى:

١- إحتواء الطبقة العليا على نسبة عالية من الماء مما يسبب وجود فراغات فى تلك الطبقة نتيجة تبخر الماء وبالتالى ضعف مقاومة الخرسانة.

٢- عند صعود الماء إلى أعلا قد يحمل معه جزيئات ناعمة من الأسمنت تكون طبقة هشة على السطح بعد تبخر الماء وجفافه ولذلك يلزم إزالة هذه الطبقة قبل الإستمرار فى الصب.

٣- تراكم طبقة رقيقة من الماء تحت سطوح الركام الكبير والحديد مما يؤدى إلى فراغات وضعف قوة التماسك بين الخرسانة و حديد التسليح.

❐ لملافاة ظاهرة النضح :

يجب إستعمال كمية ماء خلط مناسبة وعدم إستعمال خلطات مبتلة جداً أو بها نسبة قليلة من المواد الناعمة مثل الأسمنت والرمل. كما إن إستخدام نسبة من الملدنات فى الخلطة يؤدى إلى تحسين خواص الخرسانة ويعمل على تقليل ماء الخلط وتلاشى ظاهرة النضح.

****

الباب الثامن

خواص و اختبارات الخرسانة المتصلدة

Properties and Testing of Hardened Concrete

٨-١ مقاومة الضغط Compressive Strength

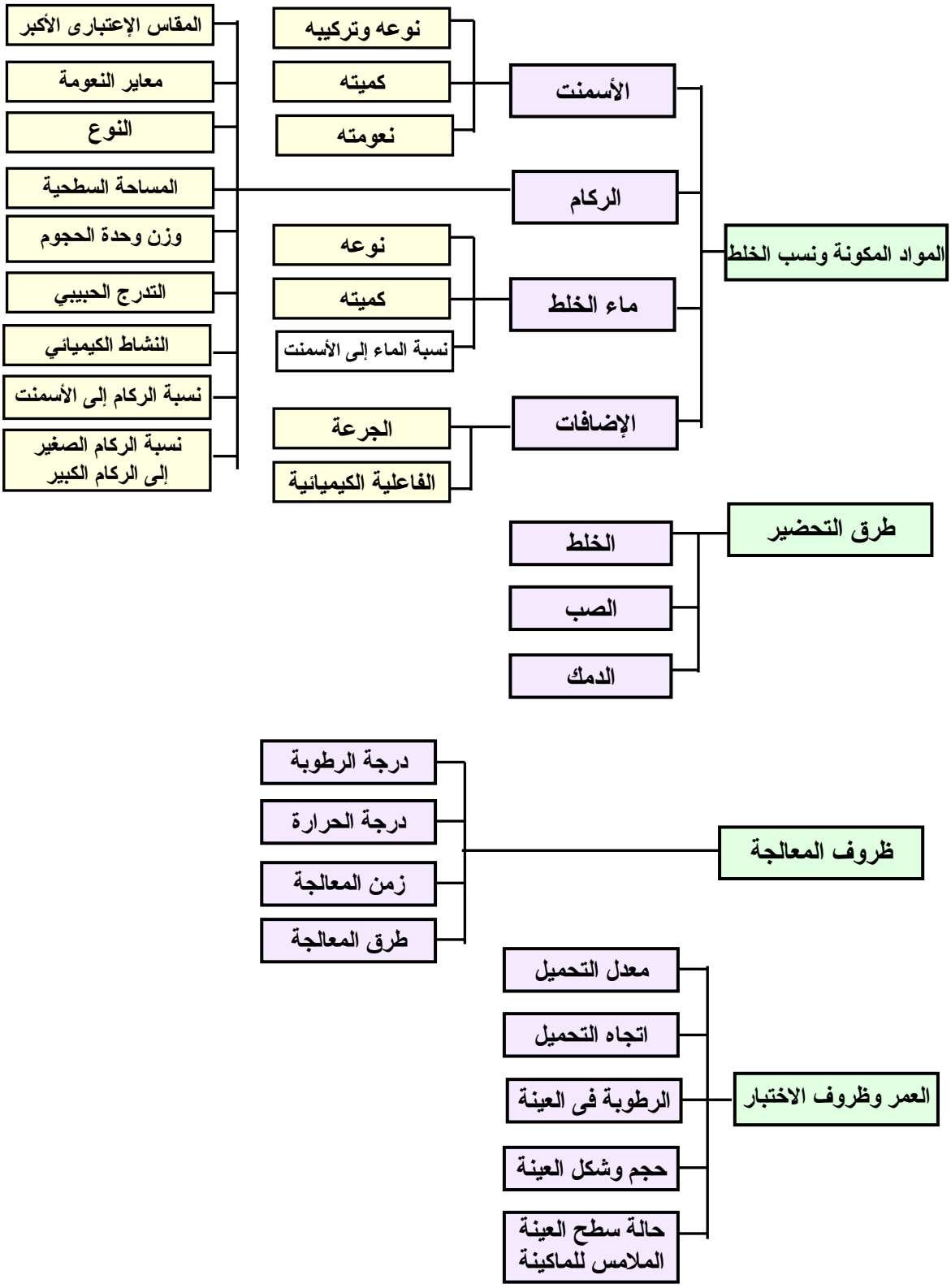
إن مقاومة الضغط هى أهم خواص الخرسانة المتصلدة على الإطلاق وهى تعبر عن درجة جودتها وصلاحيتها ، ومقاومة الضغط هى المقاومة الأم للخرسانة حيث أن معظم الخواص والمقاومات الأخرى مثل الشد و الانحناء والقص والتماسك مع حديد التسليح تتحسن وتزيد بزيادة مقاومة الضغط والعكس صحيح. لذلك يجرى اختبار الضغط بغرض التحكم فى جودة إنتاج الخرسانة فى موقع المشروع كما يستخدم هذا الاختبار فى أغراض التصميم الإنشائى لتحديد المقاومة المميزة Characteristic Strength وإجهاد التشغيل Working Stress للخرسانة فى الضغط الذى يؤخذ كنسبة من المقاومة القصوى للضغط. كما يفيد اختبار الضغط فى تحديد صلاحية الركام وماء الخلط للتعرف على تأثير الشوائب التى قد توجد بهما على مقاومة الضغط للخرسانة. والواقع حالياً أن مقاومة الضغط لخرسانة المنشآت التقليدية تتراوح بين ٢٥٠ - ٣٥٠ كج/سم^{٢} أما بالنسبة للمنشآت الخاصة والوحدات سابقة التجهيز فمقاومة الضغط تزيد عن ذلك وتصل إلى ٤٠٠ - ٥٠٠ كج/سم^{٢} والوحدات الخرسانية سابقة الإجهاد يجب أن تكون ذات مقاومة للضغط تزيد عن ٤٠٠ كج/سم^{٢} وقد تصل إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢}. وقد سبق الإشارة فى الأبواب السابقة عن إمكانية صناعة الخرسانة عالية المقاومة (مقاومة الضغط أكبر من ٨٠٠ كج/سم^{٢}) والتى نأمل أن تأخذ طريقها إلى الواقع العملي فى مصر فى المستقبل القريب.

٨-١-١ العوامل المؤثرة على مقاومة الضغط

تتأثر مقاومة الضغط بعوامل عديدة ومتنوعة يلخصها الرسم البياني شكل (٨-١) فى أربعة مجموعات رئيسية هى:

- ❒ المواد المكونة ونسب الخلط.
- ❒ طرق صناعة الخرسانة من خلط ونقل وصب ودمك.
- ❒ ظروف المعالجة.
- ❒ العمر وظروف الاختبار.

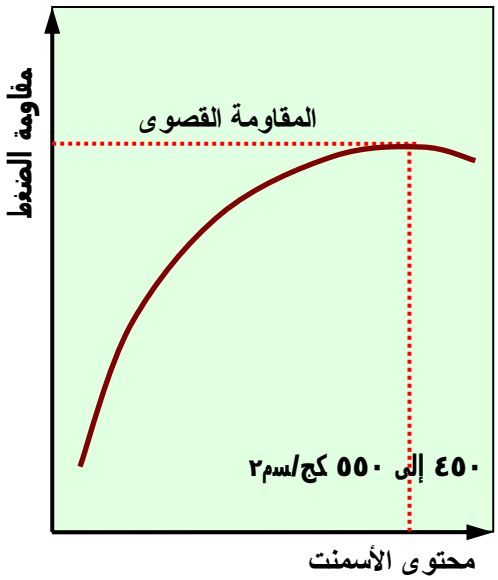
وفيما يلي شرح بإيجاز لبعض هذه العوامل.



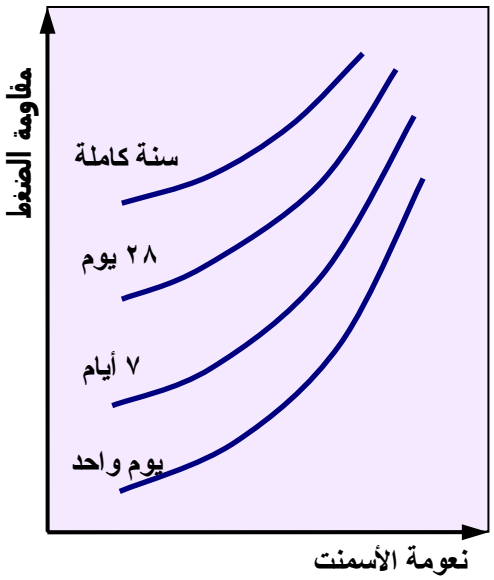
شكل (٨-١) العـوامل التى تؤثر على المقاومة.

أولاً: تأثيـــر الأســـمنت

الأسمنت هو المكون الرئيسي الفعال الذى تتوقف عليه مقاومة الخرسانة وأهم العوامل المؤثرة فى الأسمنت هى كميته ونعومته وتركيبه الكيميائي. فنجد أن مقاومة الخرسانة تزيد بزيادة محتوى الأسمنت وذلك حتى محتوى معين يقل عنده معدل الزيادة فى المقاومة ثم تتوقف الزيادة فى المقاومة بعد ذلك وربما تقل. وهذا المحتوى يختلف باختلاف نسب مكونات الخلطة وكذلك يتوقف على وجود أو عدم وجود إضافات كيميائية أو معدنية. وعموماً فقد وجد أن المحتوى الأقصى للأسمنت الذى يعطى أعلى مقاومة ضغط للخرسانة يقع بين ٤٥٠ و ٥٥٠ كج/م^{٣} (شكل ٨-٢). أما بالنسبة لنعومة الأسمنت فهي تؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الخرسانة وخاصة فى الأعمار المبكرة حتى ٢٨ يوم. بعد ذلك يقل معدل الزيادة فى المقاومة تدريجياً بتقدم عمر الخرسانة حتى يكاد ينعدم عند الأعمار المتأخرة جداً كما هو موضح بشكل (٨-٣).

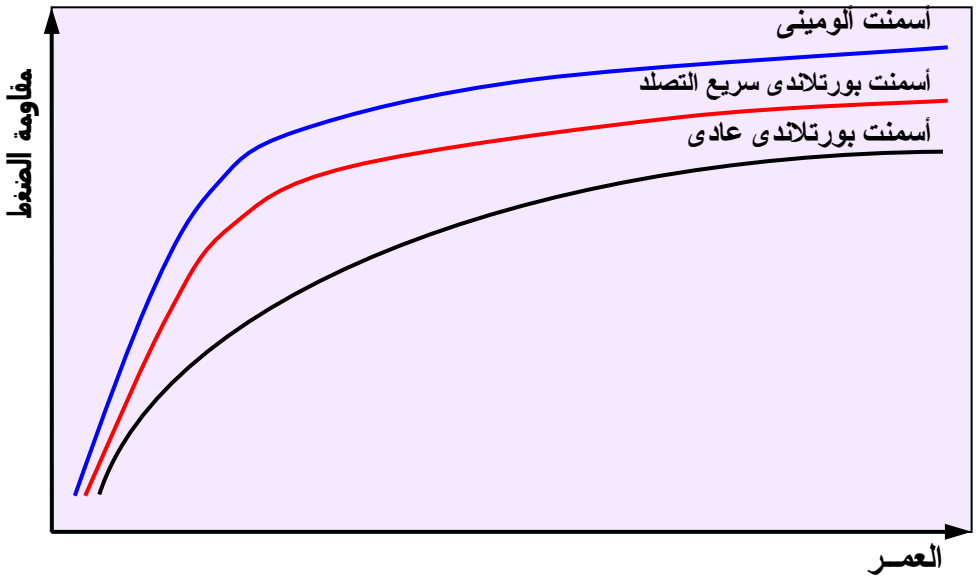


شكل (٨-٢) تأثير محتوى الأسمنت.



شكل (٨-٣) تأثير نعومة الأسمنت.

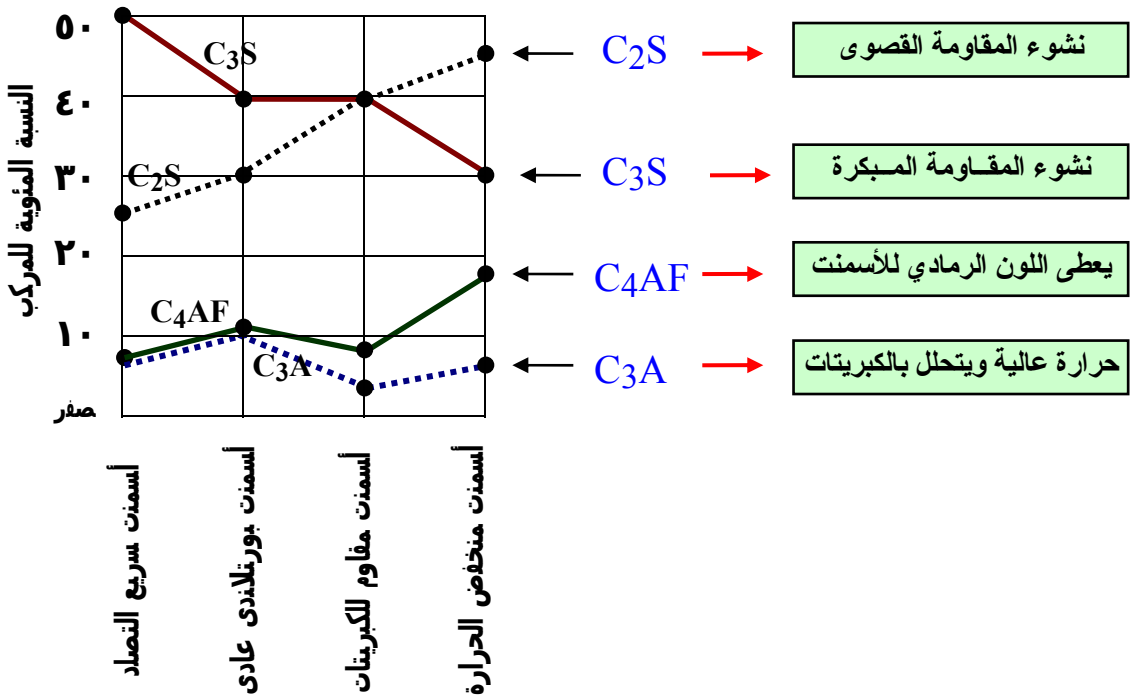
أما بالنسبة لتأثير التركيب الكيميائي للأسمنت فيعتمد ذلك بصورة كبيرة على نسب المكونات الرئيسية الأربعة للأسمنت وهى سيليكات ثنائي الكالسيوم C_2S وسيليكات ثلاثي الكالسيوم C_3S وثالث ألومينات الكالسيوم C_3A ورابع ألومينات حديد الكالسيوم C_4AF. أما العنصرين الأولين C_2S و C_3S فهما الذين يتحكمان فى المقاومة ويتراوح مجموع نسبتيهما حوالى ٧٥% . وعموماً فإن الأسمنت الذى يحتوى على نسبة عالية من C_3S يكتسب مقاومة أسرع من الأسمنت المحتوى على نسبة عالية من C_2S حيث أن C_3S هو المركب المسئول عن المقاومة المبكرة للأسمنت. أما العنصر الثالث فى الأسمنت و هو ثالث ألومينات الكالسيوم فهو المسئول عن انبعاث حرارة عالية أثناء الخلط وهو المتسبب فى وجود الخواص غير المرغوبة فى الأسمنت مثل حدوث التغيرات الحجمية و التشققات و التدهور عند التعرض للكبريتات. إلا أن هذا العنصر موجود فى الأسمنت بحكم تواجده فى المواد الخام. أما العنصر الرابع وهو رابع ألومينات حديد الكالسيوم فهو عنصر خامل تقريباً ويحل محل العناصر النشطة فى الأسمنت وبالتالي فلا يرغب فى تواجده بنسبة عالية. وبالتحكم فى نسبة المكونات الرئيسية للأسمنت وكذلك نعومته يمكننا صناعة الأنواع المختلفة من الأسمنت مثل الأسمنت سريع التصلد والأسمنت البورتلاندى العادي والأسمنت فائق النعومة والأسمنت المقاوم للكبريتات ..... إلخ. والشكل رقم (٨-٤) يوضح تأثير نوع الأسمنت حيث نجد أن الأسمنت السريع التصلد يظهر مقاومة مبكرة عالية ولكن بعد ثلاثة شهور تقريباً تكون المقاومة مساوية لتلك التى نحصل عليها من الأسمنت البورتلاندى العادي. جدول (٨-١) وشكل (٨-٥) يوضحان المكونات الكيميائية لأنواع الأسمنت المختلفة وكذلك تأثيرها على خواص الأسمنت.



شكل (٨-٤) تأثير نوع الأسمنت على مقاومة الضغط.

جدول (٨–١) خواص الأنواع المختلفة للأسمنت.

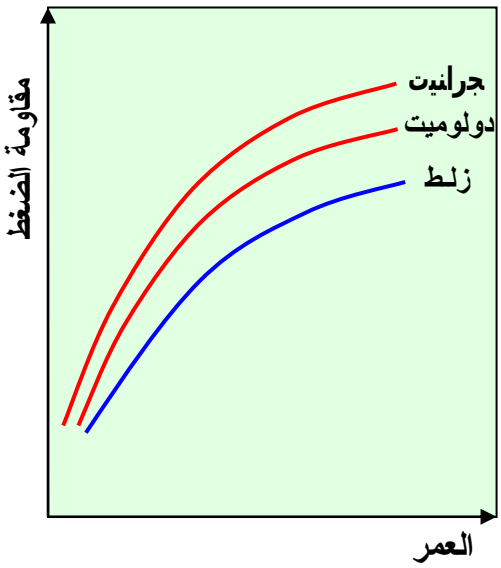
نوع الأسمنت	معدل زيادة المقاومة	الحرارة المنبعثة	الانكماش بالجفاف	مقاومة التشريخ	المقاومة للكيماويات كبريتات	أحماض
بورتلاندى عادى	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	منخفض	منخفض
بورتلاندى سريع التصلد	عالي	عالي	متوسط	منخفض	منخفض	منخفض
بورتلاندى منخفض الحرارة	منخفض	منخفض	فوق المتوسط	عالي	متوسط	منخفض
مقاوم للكبريتات	منخفض/متوسط	منخفض/متوسط	متوسط	متوسط	عالي	منخفض
بورتلاندى حديدي	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	فوق المتوسط	فوق المتوسط



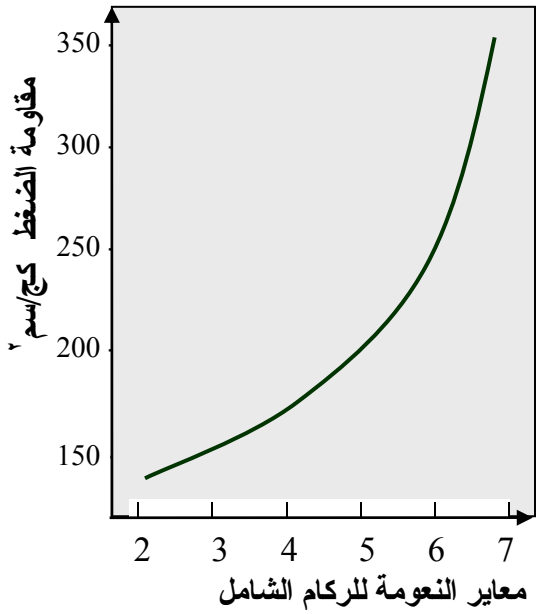
شكل (٨–٥) التركيب الكيميائي للأنواع المختلفة من الأسمنت.

ثانياً: تأثير الركام

الركام هو المادة المالئة بالخرسانة والتى يُفترض أنها خاملة كيميائياً. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتوقف على التماسك بين العجينة الأسمنتية والركام المستخدم حيث ينبغي أن تغلف العجينة الأسمنتية بكفاءة أسطح الركام المستخدم ومن ثم نجد أن نوع الركام وشكله ونعومته ومساحته السطحية وطبيعة سطحه من العوامل الرئيسية التى تؤثر على مقاومة الخرسانة. شكل (٨-٦) يوضح تأثير نوع الركام على مقاومة الضغط حيث نجد أن الحجر الجيري أو الدولوميت يعطى مقاومة أكبر من الزلط. كذلك يبين شكل (٨-٧) أن مقاومة الضغط تزيد بزيادة قيمة معاير النعومة للركام الشامل. أما المساحة السطحية للركام فتؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الضغط حيث نجد أنه عند مساحة سطحية حوالى ٢٥ سم^{٢}/جم فإننا نحصل على المقاومة القصوى التى تقل تدريجياً إذا زادت المساحة السطحية أو قلت عن ذلك كما هو موضح بشكل (٨-٨). ومساحة الركام السطحية تعتمد على نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير وكذلك على نعومة أو خشونة الركام المستخدم.



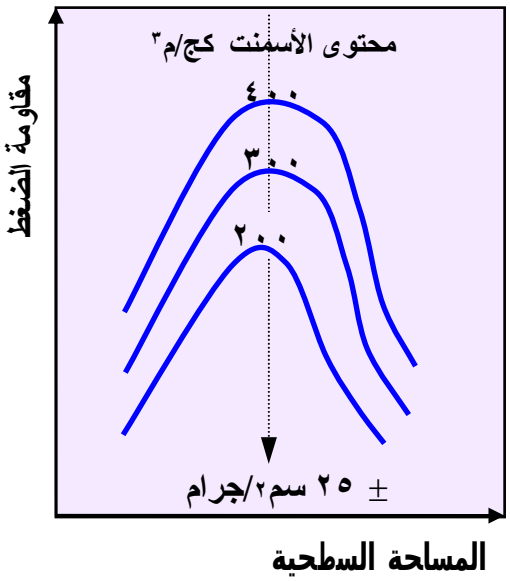
شكل (٨-٦) تأثير نوع الركام.



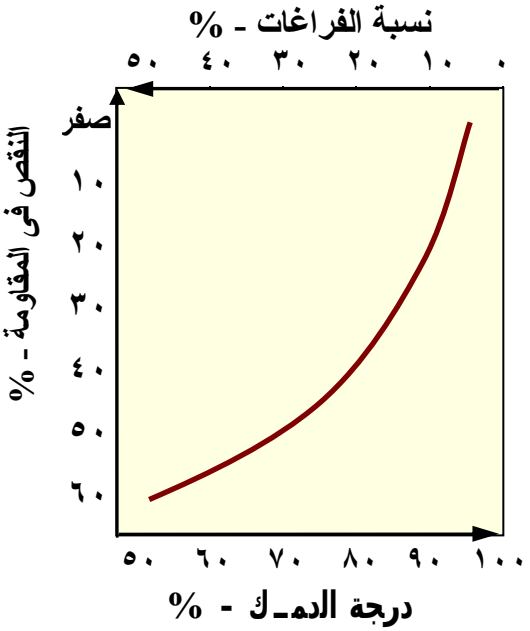
شكل (٨-٧) تأثير معاير نعومة الركام

ثالثاً: تأثير ماء الخلط و الدمك

إن تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) هو بلا شك من أهم العوامل التى تؤثر ليس فقط على مقاومة Strength الخرسانة بل أيضاً على متانتها Durability. وعموماً فإن تقليل الماء فى الخلطة إلى درجة معينة هو أساس الحصول على الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete أو الخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete. وقد سبق الحديث فى الباب الأول من هذا الكتاب عن تأثير نسبة (م/س) على الخرسانة وكذلك كيفية التحكم فى نسبة الماء فى الخرسانة باستخدام الإضافات الكيميائية (الملدنات). وقد وجد أنه عند درجة دمك محددة للخرسانة الطازجة فإن هناك نسبة معينة من (م/س) تكون عندها مقاومة الخرسانة نهاية عظمى. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتأثر تأثراً كبيراً بدرجة دمكها كما هو موضح فى شكل (٨-٩) حيث أن الدمك الغير جيد يؤدى إلى وجود فراغات هوائية فى الخرسانة تعمل على تقليل المقاومة وتدهور الخرسانة.



شكل (٨–٨) تأثير المساحة السطحية للركام.



شكل (٨–٩) تأثير الدمك.

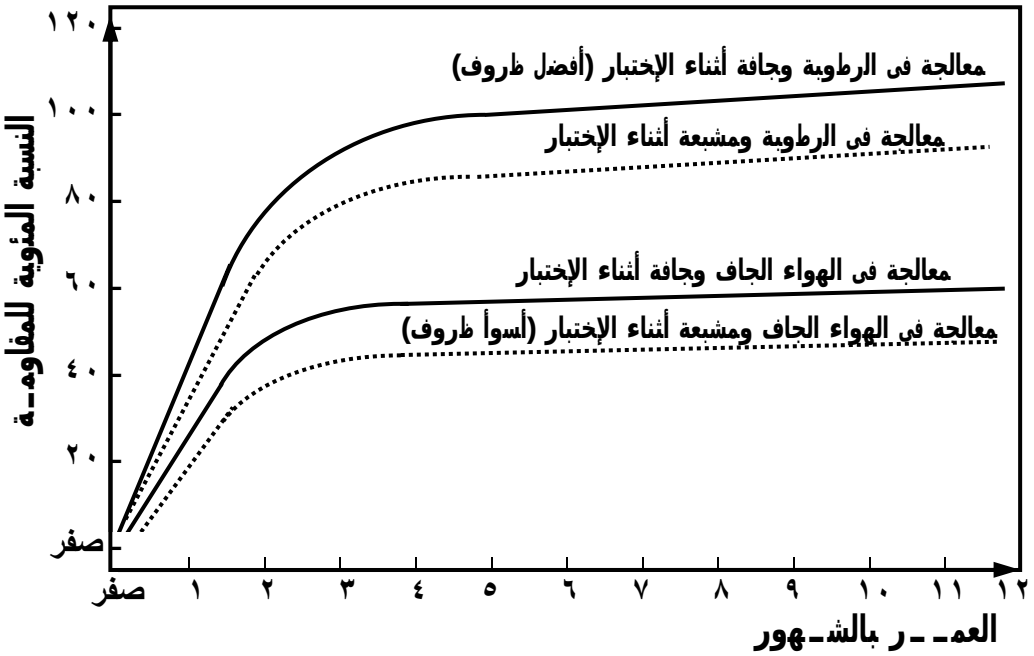
رابعاً: تأثير العمر والمعالجة

إن زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن Strength Gain يتوقف بدرجة كبيرة على الظروف المحيطة بها وكذلك على ظروف المعالجة من حيث مدتها ودرجتي الرطوبة والحرارة. فكلما زادت فترة معالجة الخرسانة فى الرطوبة كلما زادت مقاومتها. كما أن الخرسانة المعالجة فى الهواء تظهر مقاومة أقل كثيراً من الخرسانة المعالجة تحت الماء. إن الخرسانة المعالجة فى الهواء مع تعرضها لدورات الجفاف يقيد عملية الإماهة وربما يوقفها ومن ثَمَ تتوقف الزيادة فى المقاومة. ولقد أوضحت الاختبارات طويلة المدى على الخرسانة المعالجة فى الماء تحت درجة الحرارة العادية أن عملية الإماهة مستمرة حتى أعمار تصل سنوات عديدة ولكن بمعدل متناقص. و يتضح من شكل (٨-١٠) أن الخرسانة المعالجة فى الماء تظهر مقاومة أعلى بمقدار مرتين أو أكثر من مقاومة الخرسانة الغير معالجة. ولقد أوضحت الاختبارات أيضاً أن العينات الخرسانية المعالجة فى الهواء ومختبرة فى جو جاف تُظهر مقاومة أكبر من العينات المناظرة التى عُرضت للهواء نفس المدة ولكنها شُبعت بالرطوبة قبل الاختبار مباشرة. وعموماً فإن المعدل الذى تتحسن به المقاومة Rate of Strength Gain يكون كبيراً فى الأعمار المبكرة خاصة فى الأسابيع الأربعة الأولى ويقل تدريجياً مع تقدم العمر. ولذلك تم اعتبار المقاومة بعد ٢٨ يوم هى المقاومة القياسية للخرسانة.

ولقد أجريت اختبارات عديدة على أنواع مختلفة من الخرسانة لدراسة مقاومة الضغط عند أعمار مختلفة وإيجاد العلاقة بينها. والواقع أن هناك علاقات كثيرة تربط مقاومة الخرسانة فى الأعمار المختلفة بمقاومتها عند ٢٨ يوم إلا أن جميع هذه العلاقات تقريبية وتعطى قيم استرشادية فقط. وفى جميع الأحوال ينبغي اختبار الخرسانة بعد ٢٨ يوم حتى نتأكد تماماً من قيمة مقاومة الخرسانة الفعلية. وتجدر الإشارة أن اختبار الضغط بعد ٢٨ يوم لا يعطى قناعة تامة عن حقيقة مقاومة الضغط لبعض أنواع الخرسانة وخاصة تلك المحتوية على إضافات كيميائية مثل معجلات أو مؤخرات الشك وكذلك تلك المحتوية على مواد بوزولانية مثل غبار السيليكا وفى هذه الحالة ينبغي قياس المقاومة بعد ٥٦ يوم أو ٩٠ يوم على الأقل وذلك حتى تعطى صورة حقيقية عن المقاومة. وعموماً فإن الكود المصري قد أعطى بعض القيم الاسترشادية (جدول ٨-٢) للعلاقة بين مقاومة الضغط فى الأعمار المختلفة ومقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

جدول (٨–٢) قيم استرشادية لنسبة مقاومة الضغط فى أعمار مختلفة.

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٤	٣/٢	١	١,١٨	١,٣٣
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٠,٥٥	٦/٥	١	١,١١	١,١٨

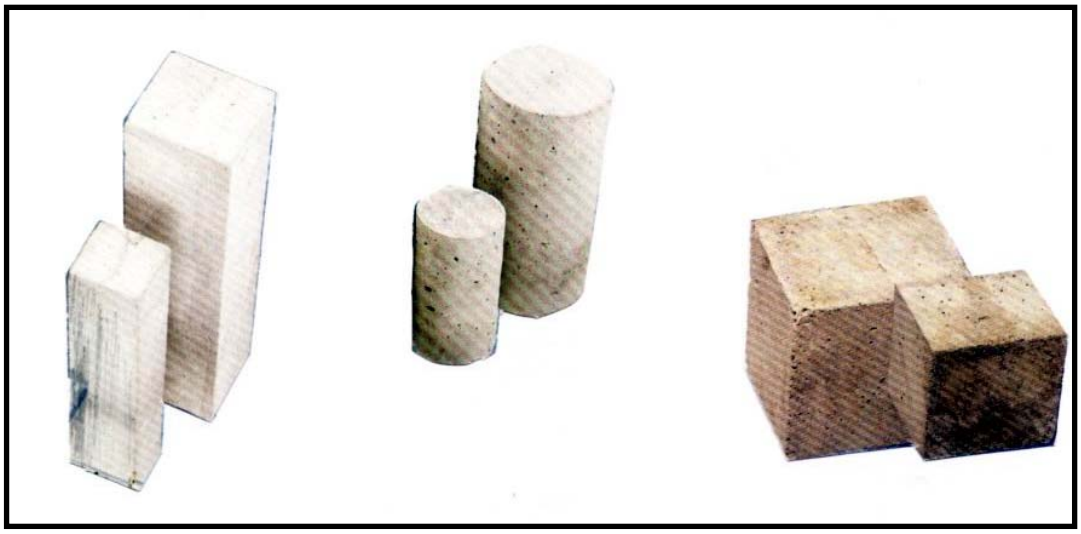


شكل (٨–١٠) معدل زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن فى ظروف معالجة مختلفة.

خامساً: تأثير شكل العينات على مقاومة الضغط

هناك ثلاثة أشكال شائعة للعينات الخرسانية التى تستخدم فى اختبار الضغط وهى: المكعبة والاسطوانية و المنشورية كما بشكل (٨-١١) وقد لوحظ معملياً أن المقاومة المقاسة لخلطة معينة من الخرسانة تختلف باختلاف شكل العينات المختبرة. كما دلت التجارب على أنه لنفس الشكل من العينات تختلف المقاومة المقاسة معملياً باختلاف مقاس العينات المختبرة.

ولقد أجريت عدة أبحاث معملية بغرض الوصول إلى شكل ومقاس موحد ومناسب للعينات الممكن استخدامها فى اختبار الضغط إلا أنه لا توجد حتى الآن طريقة نظرية أو رياضية لإعطاء حل جازم لهذه المشكلة وبذلك ظلت المواصفات الدولية مختلفة فيما بينها فى اختيار الشكل والمقاس المناسب لعينات اختبار الضغط فنجد أن المواصفات القياسية البريطانية تنص على استخدام العينات المكعبة مقاس ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨ سم بينما تنص المواصفات القياسية الأمريكية على استخدام العينات الاسطوانية مقاس ١٥×٣٠ سم ومن ناحية أخرى تنص المواصفات القياسية السويسرية على استخدام العينات المنشورية مقاس ١٥×١٥×٣٠ سم فى حين أن بعض دول وسط أوربا تشترط اختبار مجموعة عينات مكعبة بالإضافة إلى عينات منشورية من نفس الخلطة الخرسانية. ونظراً للاختلاف الواضح بين المواصفات القياسية الدولية بشأن شكل ومقاس عينات اختبار الضغط فإن الأبحاث العلمية أولت هذا الموضوع اهتماما كبيراً لمحاولة ربط المقاومة المستنتجة من أحد الأشكال بالمقاومة المستنتجة من الأشكال الأخرى. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه نظراً لتزايد استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى وقتنا الحاضر فقد ظهر الميل لاستخدام عينات صغيرة مثل المكعب ١٠×١٠×١٠ سم والاسطوانة ١٠×٢٠ سم وذلك حتى تناسب سعات ماكينات الضغط المتاحة.



شكل (٨-١١) الأشكال المختلفة من العينات الخرسانية المستخدمة فى الضغط.

ولقد بينت الاختبارات أن العلاقة بين مقاومة الضغط للمكعب ومقاومة الضغط للاسطوانة غير ثابتة لأنها تتغير نتيجة اختلاف مقاومة الخرسانة ومقاس الركام الكبير وعوامل أخرى. ويعتبر تولد قوى الاحتكاك بين سطحي عينة الاختبار ورأس ماكينة الضغط من العوامل المؤثرة على تغير العلاقة بين مقاومة الضغط للعينة المكعبة و الاسطوانية و المنشورية حيث تؤثر قوى الاحتكاك على المقاومة الظاهرية للعينات المكعبة. بينما يحدث الانهيار فى العينات الاسطوانية و المنشورية دون تأثير واضح لقوى الاحتكاك وبالتالي نجد دائماً أن مقاومة الضغط للعينة المكعبة أكبر من مقاومة الضغط للعينة الاسطوانية أو المنشورية. وسوف تتضح طبيعة تأثير هذا الاحتكاك على نتائج اختبارات الضغط فيما بعد. وتمتاز العينات الاسطوانية الشكل بأن توزيع الإجهادات على سطحها يكون منتظماً وبذلك تعطى إنعكاساً واضحاً لخواص الخرسانة. وإذا أخذنا المكعب القياسي (١٥×١٥×١٥) كأساس للمقارنة فإن الاختلاف فى نتائج اختبار العينات المكعبة و الاسطوانية و المنشورية يكون كما هو موضح بالجدول (٨-٣). غير أن النسبة الموضحة للمقاومة فى الجدول (٨-٣) تختلف باختلاف عمر الخرسانة عند اختبارها كما تختلف أيضا باختلاف مقاومة الخلطة المختبرة وكذلك تتوقف على طبيعة المواد المكونة للخرسانة فنجد مثلاً أن نسبة مقاومة المنشور إلى مقاومة المكعب تزيد كلما كانت الخرسانة المختبرة بها نسبة أكبر من الرمل والمواد الناعمة.

جدول (٨-٣) قيم استرشادية لمعامل التصحيح لنتائج مقاومة الضغط طبقاً للكود المصري ٢٠٠١.

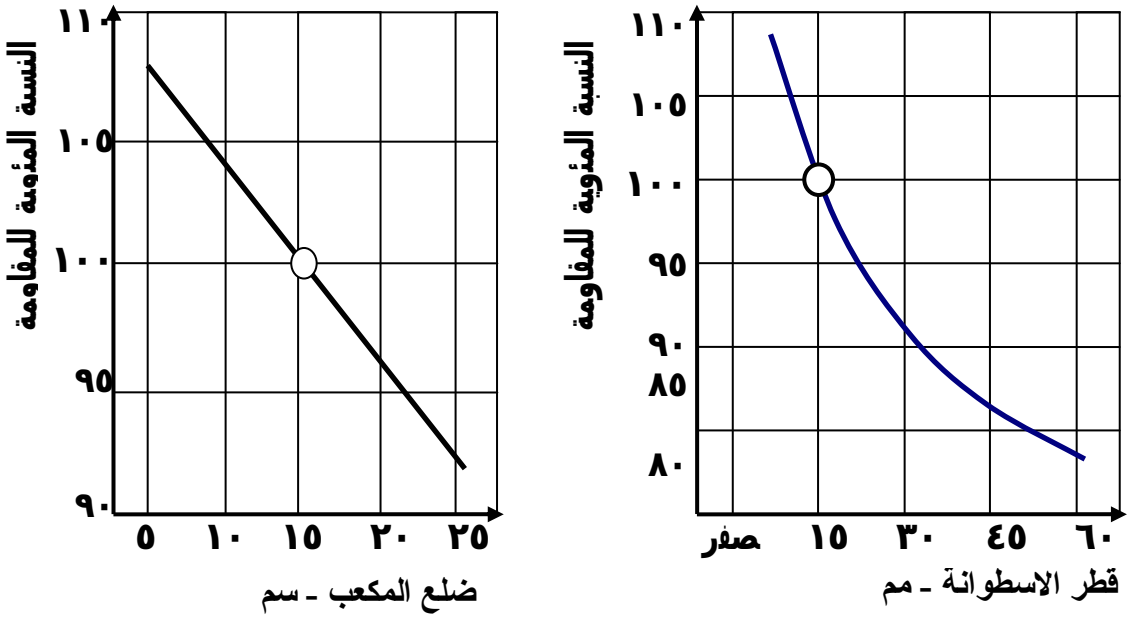
شكل القالب	الأبعاد (سم)	معامل التصحيح
مكعب	١٠×١٠×١٠	٠,٩٧
مكعب	١٥×١٥×١٥ أو ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨	١,٠٠
مكعب	٢٠×٢٠×٢٠	١,٠٥
مكعب	٣٠×٣٠×٣٠	١,١٢
اسطوانة	٢٠×١٠	١,٢٠
اسطوانة	٣٠×١٥	١,٢٥
اسطوانة	٥٠×٢٥	١,٣٠
منشور	٣٠×١٥×١٥ أو ٣١,٦×١٥,٨×١٥,٨	١,٢٥
منشور	٤٥×١٥×١٥ أو ٤٧,٤×١٥,٨×١٥,٨	١,٣٠
منشور	٦٠×١٥×١٥	١,٣٢

سادساً: تأثير المقاس على مقاومة العينات

وجد أن مقاومة الخرسانة للضغط تختلف بالنسبة للعينات المتشابهة فى الشكل والمختلفة فى الأبعاد ، فكلما زادت الأبعاد تقل مقاومة الضغط المقاسة معملياً كما بشكل (٨-١٢). ولقد أدت هذه الظاهرة بالباحثين إلى محاولة عمل توحيد قياسي على أبعاد عينات اختبار الضغط سواء كانت مكعبة أو اسطوانية أو منشورية الشكل. وبالنسبة للعينات الاسطوانية الشكل نجد أن المقاومة المقاسة تتغير تبعاً لتغير مقاس الاسطوانة كما أنها تتغير أيضا تبعاً لاختلاف نسبة ارتفاع الاسطوانة إلى قطرها (ع/ق) ، ويوضح جدول (٨-٤) عامل التصحيح لمقاومة الضغط الذى يضرب فى المقاومة التى يحصل عليها من العينات الاسطوانية غير القياسية وذلك بغرض حساب المقاومة المطلوب الحصول عليها من العينات القياسية المأخوذة من نفس الخلطة والتى يعادل ارتفاعها ضعف قطرها. و يتضح من جدول (٨-٤) أن المقاومة التى نحصل عليها من العينات التى لها (ع/ق) أقل من ٢ تكون أكبر من المقاومة القياسية مما يستدعى ضربها بعامل تصحيح يقل بقيمته عن الواحد الصحيح تبعاً لنسبة (ع/ق).

جدول (٨-٤) عامل تصحيح المقاومة المناظر لنسب (ع/ق) المختلفة للاسطوانة (ASTM C 457)

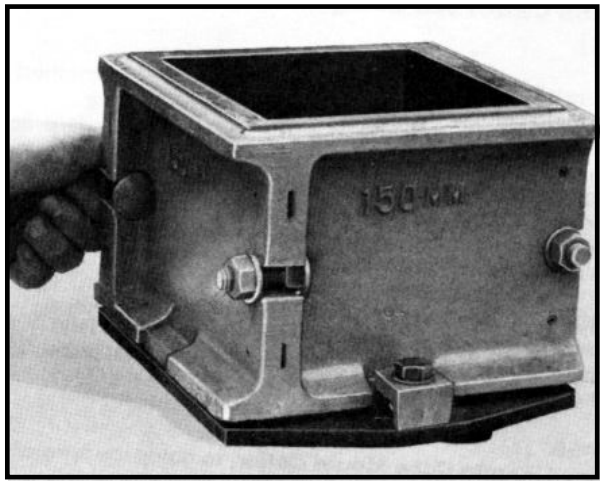
نسبة الارتفاع إلى القطر (ع/ق)	١,٠	١,٧٥	٢,٠	١,٥٠	١,٢٥	١,١٠	١,٠٠	٠,٧٥	٠,٥٠
عامل تصحيح المقاومة	٠,٣٠	٠,٧٠	٠,٨٥	٠,٩٠	٠,٩٤	٠,٩٦	٠,٩٨	١,٠	



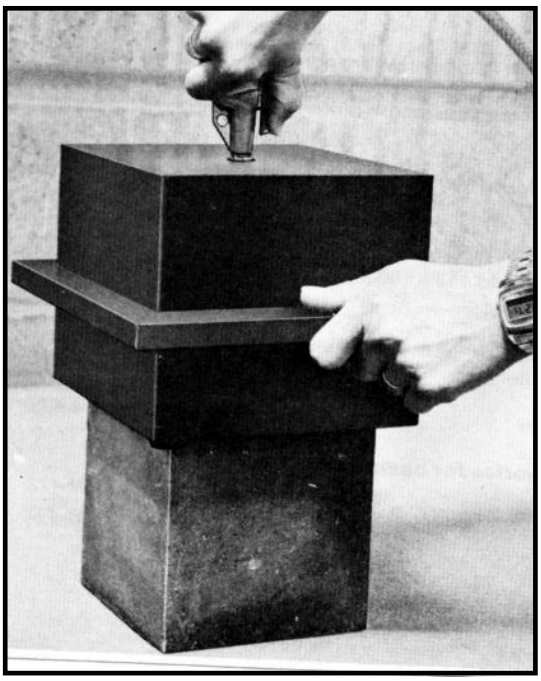
شكل (٨-١٢) تأثر مقاومة الخرسانة بتغير مقاس العينة.

سابعاً: نـوع قالب الصـب

هناك عدة أنواع من القوالب يمكن إستخدامها لصب عينات إختبار الضغط سواء للعينات المكعبة أو الإسطوانية أو المنشورية الشكل. إلا أن أكثر هذه الأنواع شيوعاً هى القوالب المعدنية ثم تأتىقوالب البلاستيك والكرتون وقوالب ورق الشمع البرافينى. ويؤثر نوع مادة القالب المستخدم على مقاومة الضغط المقاسة معملياً تبعاً لقابلية القالب لإمتصاص الماء وقابليته لتسريب الماء الأسمنتى من خلال الجدران أو إحتمال حدوث تغير فى شكل القالب Deformation خلال زمن تصلد الخرسانة. ومع أن القوالب المعدنية تُعتبر أفضل الأنواع لتجهيز عينات الإختبار إلا أن النوعين الآخرين يمتازان بقلة التكاليف وسهولة الإستعمال فى موقع العمل. وتُظهر العينات المصبوبة فى قوالب من البلاستيك مقاومة أقل من تلك التى تُظهرها مثيلاتها المصبوبة فى القوالب المعدنية. وجدير بالذكر أن المواصفات القياسية تنص على إستخدام القوالب المعدنية لتجهيز عينات إختبار الضغط إلا أنه قد يلزم فى بعض الظروف إستخدام أنواع أخرى من القوالب وفى هذه الحالة تصحح المقاومة المقاسة بضربها بعامل التصحيح المناسب. شكل (٨-١٣) يبين شكل القالب المكعب المعدنى أثناء تربيط جوانبه بينما يبين شكل (٨-١٤) القالب المناظر من البلاستيك أثناء تفريغ العينة الخرسانية منه بضغط الهواء.



شكل (٨-١٣) قالب مكعب معدنى.



شكل (٨-١٤) قالب مكعب بلاستيك.

ثامناً: ظروف التحميل

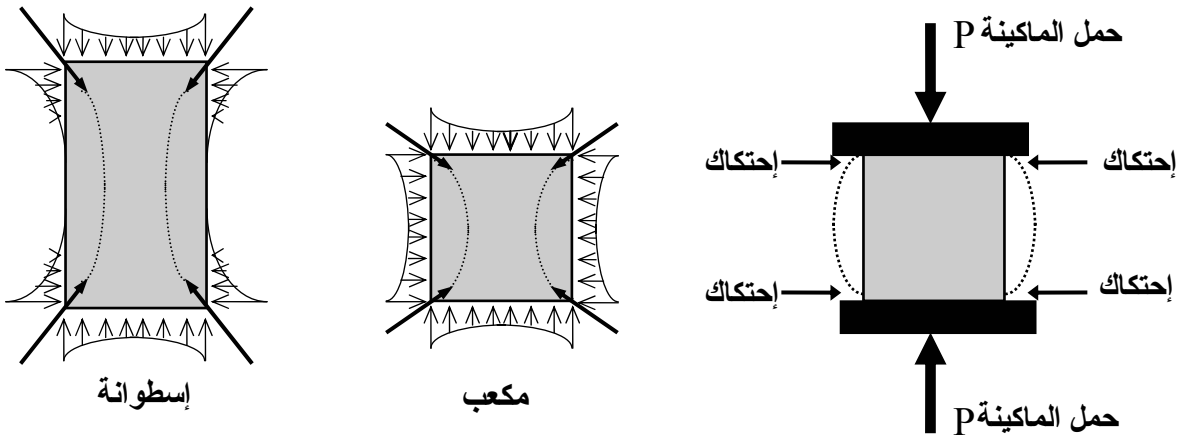
تتأثر المقاومة المقاسة لعينات اختبار الضغط بظروف التحميل المؤثرة عليها مثل طبيعة نهايات كلٍ من عينة الاختبار وماكينة الضغط وكذلك الاحتكاك الناشئ بين سطحي العينة وماكينة الاختبار. وفيما يلي توضيح موجز لتأثير هذه الظروف على نتائج اختبار الضغط.

١- طبيعة نهايات العينة

فى بعض الأحيان يُغطى السطح السفلى والعلوي لعينة اختبار الضغط بواسطة وسائد لمحاولة التغلب علي خشونة عدم استواء سطح التحميل وتختلف المقاومة المقاسة للعينات ذات الوسائد عن تلك المقاسة للعينات العادية بدون وسائد حيث وُجد أن العينات ذات الوسائد تُظهر مقاومة أعلى من مقاومة العينات العادية القياسية وذلك لأن الوسائد تعمل على توزيع الحمل بانتظام على كامل مقطع العينة المختبرة. ويعتمد اختلاف المقاومة المقاسة على نوع مادة الوسادة وعلى طريقة صبها فوق سطحي العينة. وتوصى بعض الدراسات باستعمال طبقة رقيقة من عجيبة الأسمنت كوسائد لأسطح تحميل عينات الضغط حيث أنه كلما كانت الوسادة رقيقة كانت نتائج الاختبار ممثلة للواقع. ويلاحظ أن استواء سطحي التحميل أو سطحي وسادتي التحميل يؤثر تأثيراً واضحاً على المقاومة المقاسة لعينة الاختبار حيث أن أي نسبة من الانحناء الناشئ فى هذين السطحين تسبب نقصاً كبيراً فى المقاومة الظاهرية للعينة.

٢- طبيعة أطراف ماكينة الاختبار

توضع عينات الضغط عند اختبارها بين فكي ماكينة الضغط اللذين يشكلان لوحي التحميل المعدنيين. ويجب أن تكون مساحة لوح التحميل المعدني مساوية على الأقل أو أكبر من مساحة سطح العينة المعرض للتحميل. ومن المعروف أنه كلما كانت العينة كبيرة أو ذات مقاومة عالية جداً فإنه يلزمها ألواح تحميل معدنية سميكة حتى لا تكون هذه الألواح مرنة بالنسبة للأحمال الكبيرة التى ستؤثر عليها مما قد يسبب تركيز الإجهادات على سطح العينة. أما إذا كانت عينة الاختبار صغيرة وألواح التحميل المعدنية سميكة نوعا ما فإنه يمكن اعتبار هذه الألواح جاسئة تماما بالنسبة للأحمال الصغيرة التى سوف تتعرض لها وبذلك تستطيع هذه الألواح أن تعطى أحمالاً موزعة بانتظام على سطح عينة الاختبار.



شكل (٨–١٥) تأثير الإحتكاك بين العينة والماكينة.

٣- الاحتكاك بين سطحي العينة وماكينة إختبار الضغط

عند تحميل الأسطح الأفقية لعينة الإختبار تنضغط هذه العينة رأسيا أو تنكمش بسبب إجهادات الضغط الواقعة عليها بينما تحاول جوانب العينة أن تتمدد أفقيا إلا أن حركة التمدد الجانبى هذه سوف تقاوَم بواسطة الإحتكاك الذى ينشأ فى هذه اللحظة بين لوحى التحميل المعدنين والسطحين الأفقيين لعينة الإختبار. وتتولد قوى الإحتكاك هذه بقيمة قصوى عند أطراف سطحى العينة وتقل قيمتها تدريجيا كلما إتجهنا إلى الداخل حتى تتلاشى تماماً كماهو موضح بشكل (٨-١٥). ولقد وجد أن الإحتكاك الناشئ بين سطحى العينة وفكى ماكينة الإختبار يؤثر تأثيراً بالغاً على نتائج الإختبارات ويلعب دوراً كبيراً فى الإختلاف الملحوظ فى نتائج إختبارات العينات الخرسانية ذات الأشكال والمقاسات المختلفة ويرجع هذا إلى أن قوى الإحتكاك المتولدة تحاول أن تقاوم الإنفعال الجانبى للعينة وبذلك فهى - بطريقة غير مباشرة - تقاوم الإنفعال الرأسى الناتج عن التحميل وبذلك تكسب العينة مقاومة زائدة لأحمال الضغط مما يسبب تسجيل مقاومة أعلى للعينة على تدريج ماكينة الإختبار.

ويلاحظ أن تأثير قوى الإحتكاك المتولدة بين سطحى العينة وفكى الإختبار يظهر فى العينات المكعبة بوضوح بالمقارنة مع العينات المنشورية حيث أنه تنعدم إجهادات الإحاطة على جوانب المنشور فى المنطقة القريبة من منتصف الإرتفاع بينما لا تنعدم هذه الإجهادات على جوانب المكعب تقريباً مما يسبب تقوية زائدة للمكعب. وتشبه إجهادات الإحاطة فى حالة الإسطوانة مثيلتها فى حالة المنشور. وذلك يفسر ميل العينات المكعبة بصفة دائمة إلىإظهار مقاومة ضغط أعلى من المقاومة التى تظهرها عادة الإسطوانة أو المنشور. كذلك يزيد تأثير قوى الإحتكاك وإجهادات الإحاطة الناتجة عنها لنفس العينات المكعبة كلما صغُر مقاس تلك العينة وبذلك تظهر العينات المكعبة صغيرة المقاس مقاومة أعلى من المقاومة التى تظهرها العينات المكعبة كبيرة المقاس.

٤- معدل التحميل

عند إختبار عينات الضغط لوحظ أنه كلما أسرعنا من معدل التحميل فإن هذه العينات تُظهر مقاومة أعلى للضغط. ولذلك فإنه ينبغى أن تحمل العينات الخرسانية المكعبة بحمل ضغط بحيث لاينتج عنه أى صدم على العينة ثم يزداد الحمل تدريجيا بمعدل ١٤٠ كج/سم٢/دقيقة حتى لحظة تسجيل العينة لأقصى حمل على ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الدراسات المعملية أن زيادة فترة التحميل بحيث تصل إلى عدة أيام تسبب نقصا كبيراً فى المقاومة المقاسة بالإضافة إلى أن الإنفعالات المقاسة للعينة تكون أكبر بكثير من المعتاد. ولما كانت الإنفعالات المقاسة على العينة تتأثر أيضا بمعدل التحميل حيث تقل كلما زاد معدل التحميل فإنه بناءاً على ذلك يزداد معاير المرونة المقاس للعينة الخرسانية كلما زاد معدل التحميل.

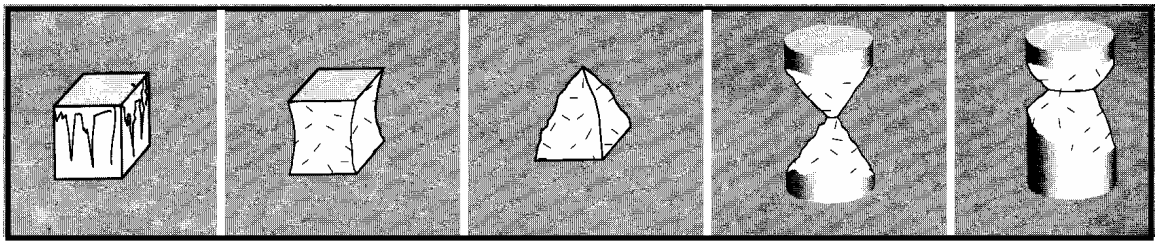
تاسعاً: إتجاه التحميل

عند اختبار العينات المكعبة فإن تحميلها فى ماكينة الضغط يكون إما فى إتجاه الصب أو فى الإتجاه العمودى عليه ويؤثر إتجاه تحميل العينة بالنسبة لإتجاه الصب تأثيراً واضحاً على مقاومة العينة للضغط. ويُلاحظ أنه بالنسبة للعينات الإسطوانية أو المنشورية الشكل فإن إتجاه التحميل يكون دائماً فى إتجاه الصب بينما يكون إتجاه التحميل فى العينات المكعبة عمودياً على إتجاه الصب وذلك بغرض جعل الأسطح المصقولة للمكعب ملامسة لرأس ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الأبحاث التى أجريت بهذا الشأن أن العينات التى تُختبر بحيث يكون إتجاه التحميل المؤثر عليها مطابقاً لإتجاه الصب تُظهر مقاومة أكبر بحوالى ٨% من المقاومة التى تُظهرها العينات التى تُختبر بإتجاه تحميل عمودى على إتجاه الصب. بينما أظهرت دراسات أخرى أن الخرسانة إذا كانت غنية بالأسمنت ومخلوطة ومدموكة جيداً فإن تأثير إتجاه التحميل على مقاومة الضغط المقاسة يتلاشى تقريباً خصوصاً إذا كان التحميل مؤثراً بحيث يعطى إجهادات موزعة بإنتظام على سطح العينة طوال فترة الإختبار.

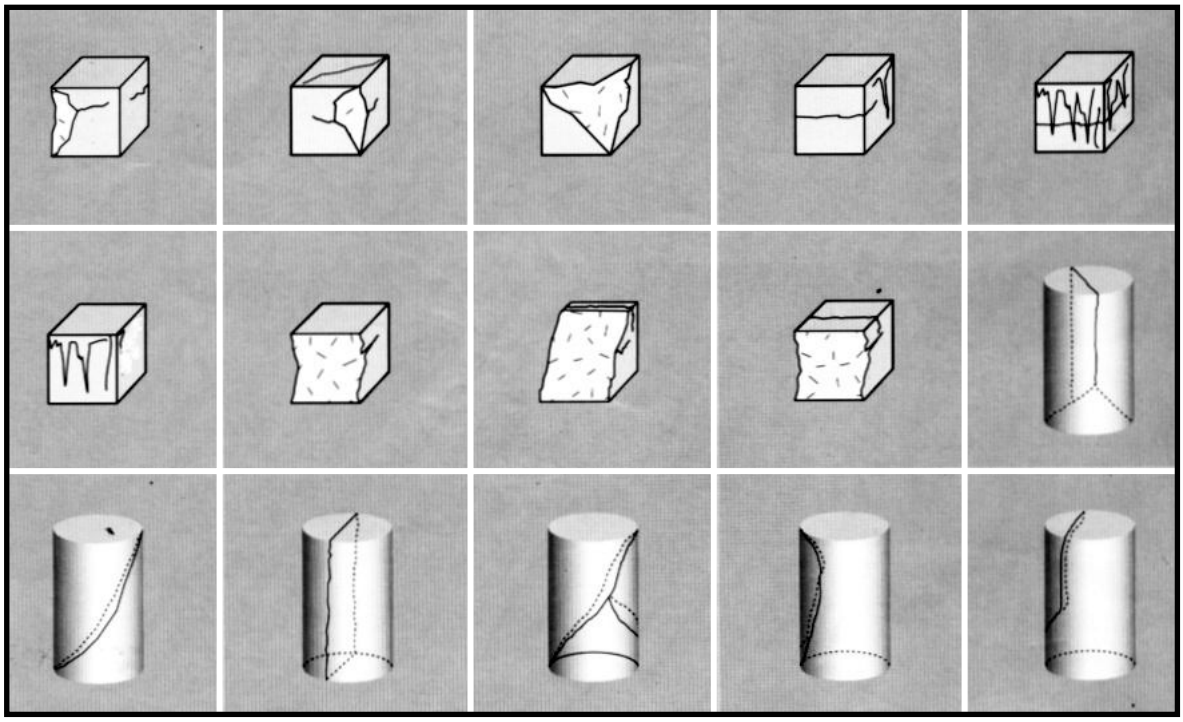
وقد يرجع سبب ضعف المقاومة للمكعبات القياسية التىتختبر فى إتجاه عمودى على إتجاه الصب إلى أن مركز ثقل المكعب الخرسانى فى هذه الحالة يكون مزحزحاً عن محور التحميل بسبب ميل هذا المركز لأن يكون قريباً من الطبقات الأفقية السفلى أثناء عملية الصب مما يسبب لا مركزية فى التحميل تضعف المقاومة المقاسة نظراً لتولد إجهادات الإنحناء.

٨-١-٢ أشكال الانهيارات المحتملة للخرسانة تحت تأثير حمل الضغط

إن الانهيارات الحادثة فى العينات علىإختلاف أشكالها نتيجة إختبارات الضغط نادراً ما تكون بسبب إجهادات الضغط فقط وإنما هى فى الغالب إنهيار قص أو إنهيارات شد ضلعى. هذا بالإضافة إلى أن الإنهيارات التى تحدث فى عينات الإختبار تختلف فى أشكالها كليةً عن الإنهيارات الممكن حدوثها فى الأعضاء الخرسانية فى المنشأ. ومن خلال الدراسات المعملية يمكن ملاحظة أن عينات إختبار الضغط القصيرة نسبيا مثل المكعبات والإسطوانات القياسية تتأثر بإجهادات الإحاطة الجانبية الواقعة عليها من إحتكاك نهايتها مع رأس الماكينة فتنهار على شكل مخروط ناقص كما هو موضح بشكل (٨-١٦). وهذا الشكل المخروطى ناتج عن تأثير إجهاد الضغط المحورى مضافاً عليه إجهادات الإحاطة الجانبية. بينما يلاحظ أنه لو حاولنا ملاشاة الإحتكاك الناشئ من نهايات العينة ورأس الماكينة بواسطة طبقة من الزيت تفصل بينهما فإن إجهادات الإحاطة تقل وبالتالى تقل مركبة القوى الأفقية المؤثرة على العينة ويتحول شكل الإنهيار الحادث إلى شكل إنفلاق Splitting. وقد تحدث بعض الأخطاء أثناء التأثير بالحمل نتيجة عدم مركزية الحمل أو عدم إستواء أوجه العينة أو أى أسباب أخرى مما يؤدى إلى حدوث الإنهيار بشكل غير طبيعى أو غيرصحيح كما فى شكل (٨-١٧) وغالباً تكون المقاومة الحقيقية لهذه العينات أكبر من القيمة التى تقرأها الماكينة بنسبة قد تصل إلى ٣٠% .



شكل (٨-١٦) شكل انهيار صحيح لعينات إختبار فى الضغط.



شكل (٨-١٧) شكل إنهيار غير صحيح لعينات اختبار فى الضغط.

٨-١-٣ اختبار مقاومة الضغط Compressive Strength Test

يجرى إختبار تحديد مقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة عادة بعد مرور ٢٨ يوماً على صب العينات وفى بعض الأحيان بعد ٧ أيام أو بعد فترة أخرى حسب الحاجة.

عينات الاختبار :

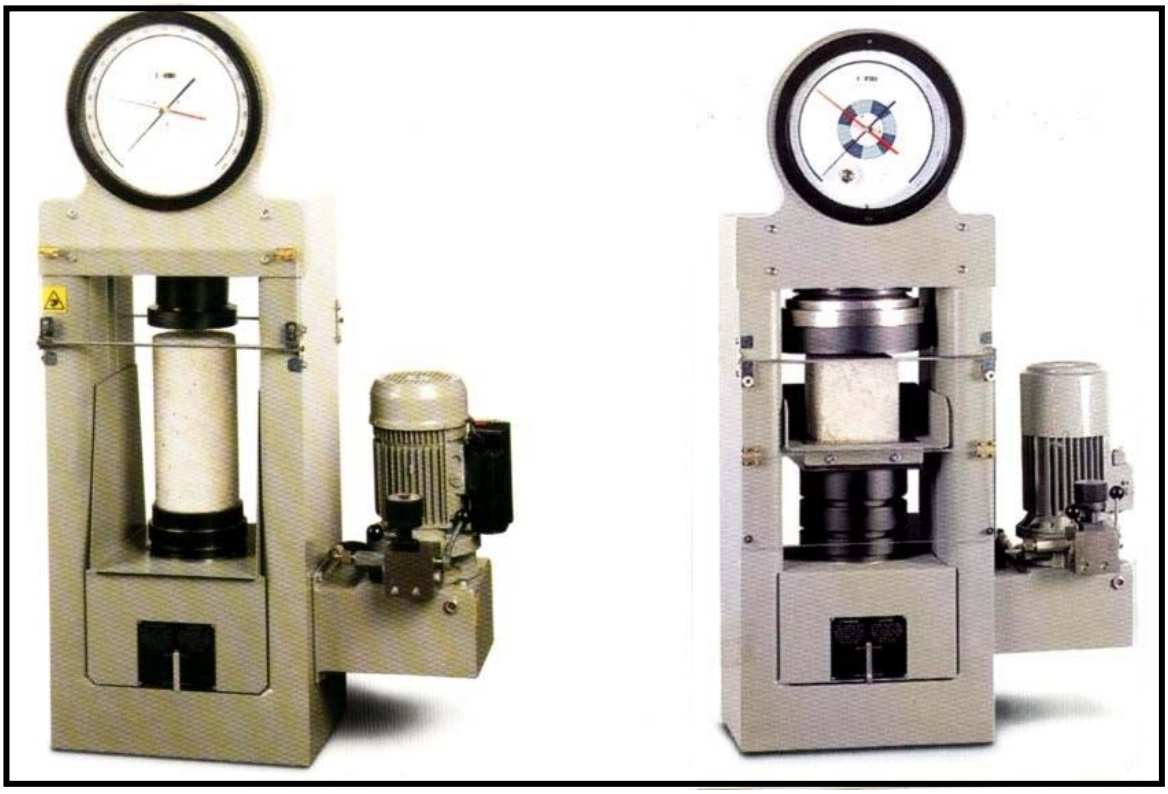
تكون عينة الإختبار بشكل مكعب طول ضلعه ١٥,٨ سم أى مساحة الوجه = ٢٥٠ سم٢ أو مكعب طول ضلعه ١٥ سم أو إسطوانة قطرها ١٥ سم وإرتفاعها ٣٠ سم.

طريقة إجراء الاختبار:

- **توزن الكميات اللازمة من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير (أو المقاسات المحجوزة على المناخل منفصلة) والماء ويراعى عند حساب الوزن أن تزيد كمية الخرسانة المخلوطة عن الخرسانة اللازمة لملء القوالب بحوالى ١٥% وذلك لتعويض أى فقد أو هالك قد يحدث أثناء الإختبار.**

- **يُعد قالب الإختبار وتُغطى أوجه القالب الداخلية بطبقة رقيقة من الزيت الخفيف.**
- **تخلط مكونات الخرسانة إما ميكانيكياً أو يدوياً خلطاً جيداً حتى يصبح لونها متجانس.**
- **بمجرد الإنتهاء من الخلط تُجرى إختبارات القوام (الهبوط مثلاً) وأى إختبارات أخرى تكون مطلوبة مثل إختبارات القابلية للتشغيل (عامل الدمك أو فيبى) أو إختبار تحديد نسبة الهواء فى الخلطة.**
- **بعد إختبارات الخرسانة الطازجة يُملأ القالب مباشرة بالخرسانة على ٣ طبقات وتدك كل طبقة إما بمكنةالإهتزاز أو يدويا حتى تدمك الخرسانة دمكاً تاماً دون حدوث إنفصال حبيبى.**
- **تغطى القوالب بعد صبها مباشرة وتوضع فى مكان درجة حرارته ١٥ إلى ٢٠ درجة مئوية لفترة ٢٤ ساعة ويلاحظ أن لا تتعرض لأى إهتزازات.**
- **تُعلم العينات الخرسانية بعد ذلك ثم تفك من القوالب وتُغمر فى الحال فى ماء نقى درجة حرارته حوالى ١٥ ـ ٢٠ درجة مئوية وتُترك حتى وقت الإختبار ويُفضل ترك مسافات بين المكعبات وبعضها فى أحواض المعالجة كما يُنصح بعدم وضع المكعبات فوق بعضها.**
- **تختبر العينة بوضعها بماكينة الإختبار حيث يكون محورها منطبقاً مع محور رأس الماكينة وفى حالة العينة المكعبة يلزم أن يكون وجهى العينة الملامسين لسطحى رأس الماكينة هما الوجهين المقابلين للسطح الداخلى للقالب المعدنى لضمان استوائهما وتوازيهما. أما فى حالة العينة الإسطوانية فيلزم عمل مخدة Capping لسطح كل من نهايتى الإسطوانة بطريقة تجعل سطح النهايتين مستويين ومتوازيين. شكل (٨-١٨) يبين وضع المكعب والإسطوانة فى ماكينة الضغط. ولكل إختبار تختبر ثلاث عينات وتؤخذ القيمة المتوسطة للنتائج. أما شكل (٨-١٩) فيوضح شكل الكسر فى عينات خرسانية مكعبة بعد إجراء إختبار الضغط عليها.**
- **تعرض العينة لحمل ضغط محورى بمعدل حوالى ١٤٠ كج/سم٢/دقيقة حتى الكسر وتدون النتائج فى جدول كما يلى:**

رقم العينة	التاريخ	عمر الخرسانة	وزن العينة	أبعاد العينة	مساحة الوجه	حمل الكسر	مقاومة الضغط كج/سم٢
١ ٢ ٣	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٧ أيام					
٤ ٥ ٦	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٢٨ يوم					



شكل (٨-١٨) وضع للعينات المكعبة والاسطوانية فى ماكينة الضغط.

شكل (٨-١٩) الكسر للعينات المكعبة فى إختبار مقاومة الضغط.

٨–٢ مقاومة الشد Tensile Strength

٨–٢–١ العلاقة بين مقاومتى الشد والضغط

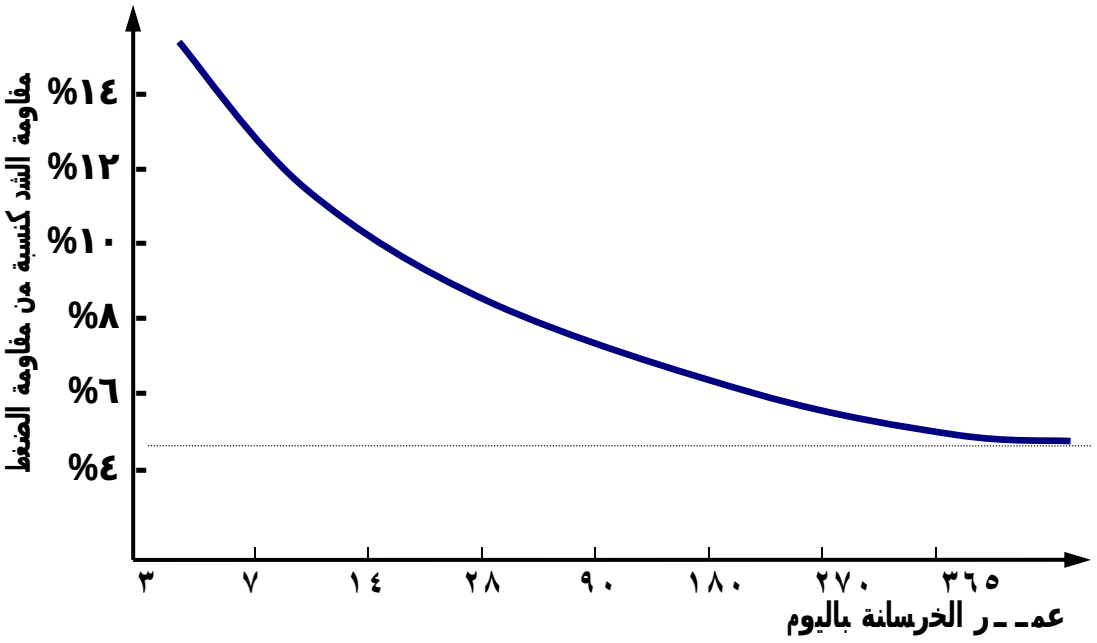
تتحمل الخرسانة العادية المتصلدة مقاومة الضغط بدرجة كبيرة ولذلك يجرى تصميم الخرسانة بإعتبارها تقاوم إجهادات الضغط أساساً أما بالنسبة لمقاومتها لقوى الشد (سواء المباشر أو غير المباشر) فإنها تعتبر ضعيفة المقاومة للشد إذا ما قورنت بمقاومتها للضغط ويرجع هذا لكونها مادة قصفة ومع ذلك إهتم الباحثون بمقاومة الشد فى الخرسانة لأن حدوث معظم التشققات والشروخ فيها ناتج عن صغر مقاومتها للشد. ومقاومة الشد فى الخرسانة تتراوح ما بين ٧% إلى ١٤% من مقاومتها للضغط أى بنسبة متوسطة قدرها ١٠% وتختلف هذه النسبة تبعاً لعمر الخرسانة كما بشكل (٨-٢٠) وكذلك تعتمد هذه النسبة على رتبة الخرسانة كما بشكل (٨-٢١) ويلاحظ أنه كلما زادت مقاومة الخرسانة للضغط كلما قلت الزيادة النسبية لمقاومة الشد إلى أن تصل مقاومة الضغط إلى حوالى ٨٠٠ كج/سم٢ عندها تصل مقاومة الشد إلى أقصى قيمة لها والتى تتراوح من ٦٠ إلى ٧٠ كج/سم٢. ويمكن إستخدام المعادلتين التاليتين فى حساب مقاومة الشد للخرسانة:

١- للأعمار المبكرة

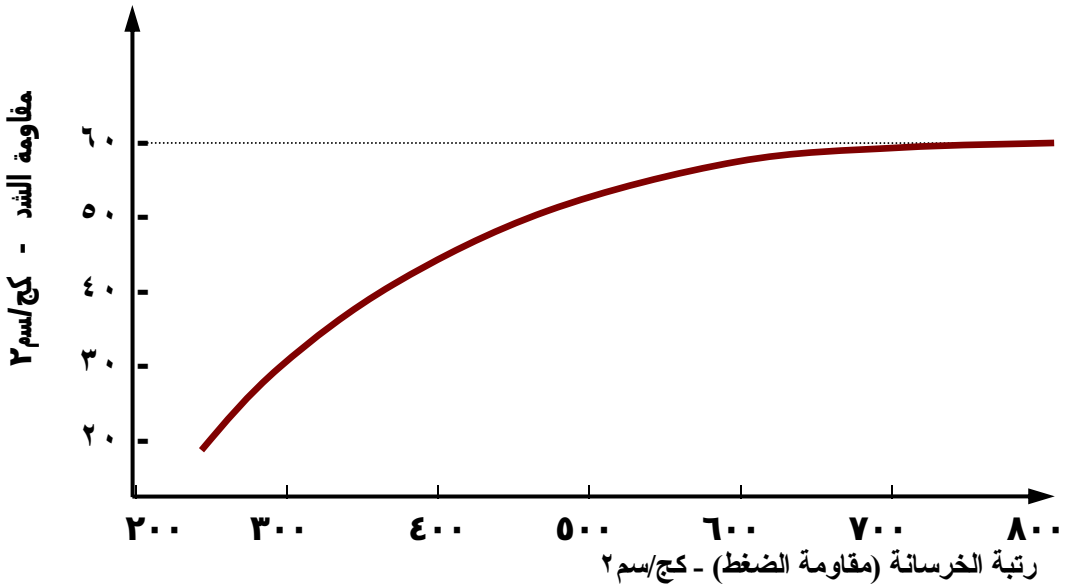
$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٨} : \frac{١}{١٢} = ١٠\%$$

٢- للأعمار المتأخرة

$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٢٠} = ٥\%$$



شكل (٨–٢٠) اختلاف مقاومة الشد بإختلاف عمر الخرسانة.



شكل (٨-٢١) إختلاف مقاومة الشد بإختلاف رتبة الخرسانة.

٨-٢-٢ طرق إختبار مقاومة الشد للخرسانة

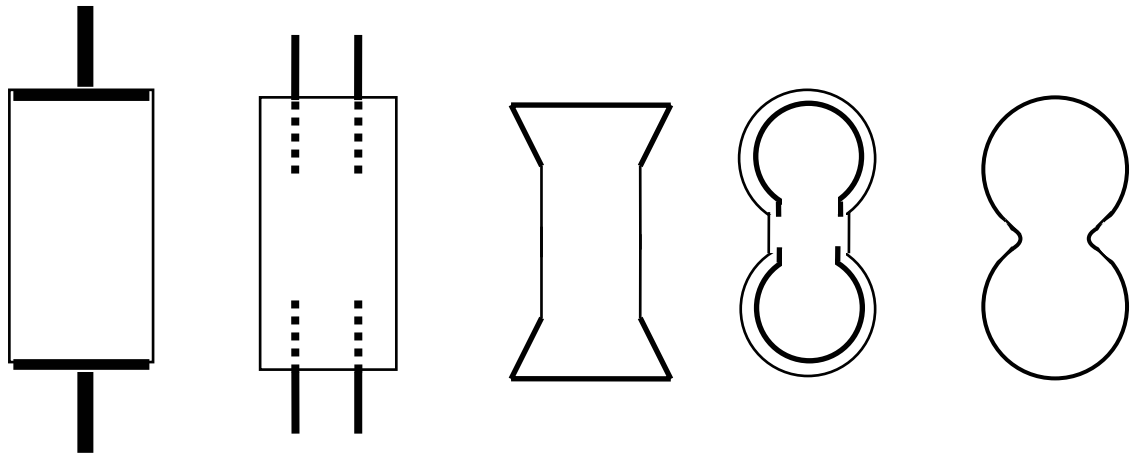
يمكن تعيين مقاومة الشد فى الخرسانة بعد ٧ أيام أو ٢٨ يوم أو أى مدة أخرى بطرق مباشرة وغير مباشرة كما يلى:

أولاً: إختبار الشد المباشر Direct Tensile Strength

تطورت أشكال العينات الخرسانية فى إختبار الشد المباشر كما هو موضح بشكل (٨-٢٢).

- تحضر العينات للإختبار بإجراء عمليات الخلط والصب والدمك والمعالجة بنفس الطريقة السابق ذكرها فى إختبار الضغط.
- يجرى الإختبار بمسك العينة عند نهايتيها بماكينة الإختبار والتأثير بحمل الشد تدريجيا وببطء ويعين الحمل المسبب لكسر العينة حيث تنكسر معظمها فى المنتصف وتحسب مقاومة الشد فى هذه الحالة بقسمة الحمل الأقصى على مساحة مقطع العينة.

$$\text{مقاومة الشد المباشر} = \frac{\text{الحمل الأقصى}}{\text{مساحة المقطع}} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{كج/سم}^2$$



شكل (٨-٢٢) أشكال العينات الخرسانية فى إختبار الشد المباشر.

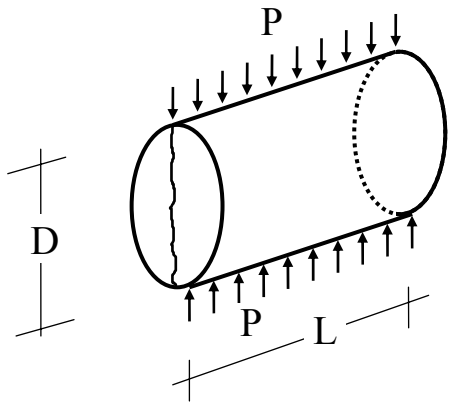
ونظراً لصعوبة إجراء إختبار الشد المباشر نتيجة الصعوبة النسبية فى صب و فك عينة الإختبار ونظراً لوجود إجهادات ضغط مركزة بين كلابات التثبيت وعينة الإختبار وكذلك إحتمال عدم مركزية حمل الشد فإنه يتم اللجوء إلى طرق غير مباشرة لقياس مقاومة الشد.

ثانياً: إختبار الشد غير المباشر (الطريقة البرازيلية) Indirect Tensile Strength

عينة الاختبار القياسية عبارة عن إسطوانة خرسانية قطرها ١٥ سم وطولها ٣٠ سم حيث توضع هذه الإسطوانة بين رأسى ماكينة الإختبار فى وضع أفقى وعلى جانبيها بين شريحتين من الخشب الأبلكاج أو المطاط بعرض ٢ سم ويعين حمل الضغط المسبب لكسر العينة وعند إنهيارها يسجل الحمل الأقصى.

$$\text{مقاومة الشد غير المباشر (البرازيلي)} = \frac{\text{٢} \times \text{الحمل الأقصى}}{\text{ط} \times \text{الطول} \times \text{القطر}} \quad \text{كج/سم}^{\text{٢}}$$

$$\text{مقاومة الشد البرازيلي} = \frac{2P}{\pi DL} \quad \text{كج/سم}^{\text{٢}}$$

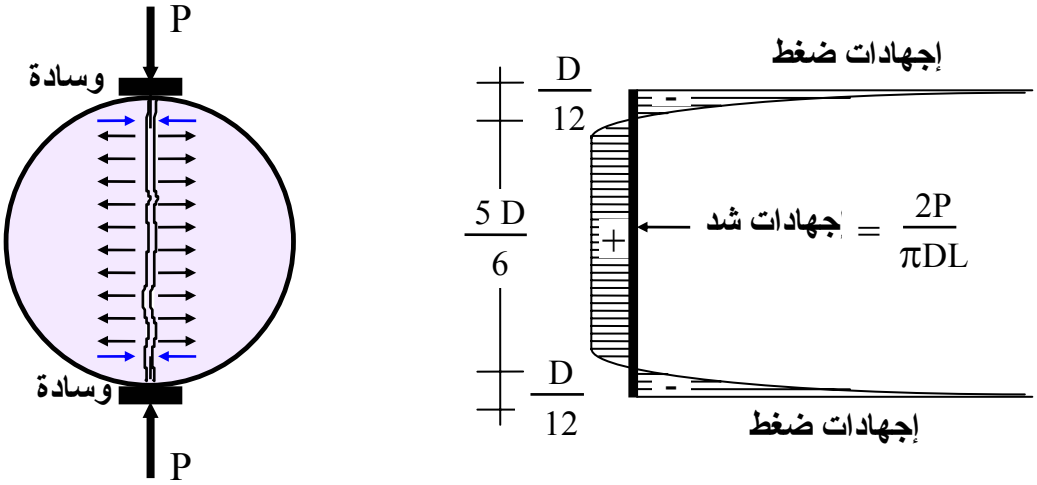


حيث:

P = الحمل الأقصى ..... كج
D = قطر الإسطوانة ..... سم
L = طول الإسطوانة ..... سم

شكل (٨-٢٣) اسطوانة الشد البرازيلى.

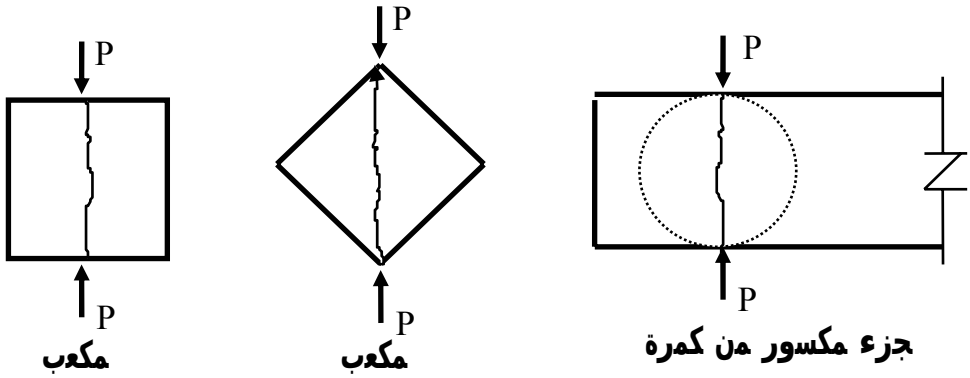
ويكون المستوى الرأسى للإنهيار هو مستوى إجهادات الشد الرئيسية حيث تكون موزعة على ٨٠% من طوله وفى نفس الوقت توجد إجهادات ضغط تتراوح قيمتها من ١٦ إلى ١٨ مرة قدر إجهادات الشد وذلك فى المنطقتين تحت تأثير الحمل مباشرة (فى طرفى مستوى الإنهيار). ويتميز إختبار الشد غير المباشر بسهولة الإجراء وكذلك لوجود إجهادات الشد بقيمة ثابتة و منتظمة على حوالى ٦٠% من طول مستوى الإنهيار كما بشكل (٨-٢٤). وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية لـ ٨٥% من قيمة مقاومة الشد البرازيلى.



شكل (٨-٢٤) توزيع الإجهادات فى عينة الشد البرازيلى.

ويمكن إجراء الإختبارعلى عينات بشكل منشور أو مكعب أو جزء من كمرة كما بشكل (٨-٢٥). وفى هذه الحالة يجب تصحيح قيمة المقاومة بضربها فى عامل k يتوقف علىتغير أبعاد العينة ويعين معمليا.

مقاومة الشد البرازيلى $= k \frac{2P}{\pi DL}$ كج/سم٢ .



شكل (٨-٢٥) إمكانية إجراء إختبار الشد البرازيلى على عينات مختلفة.

وعموماً فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية قد أعطى بعض القيم الإسترشادية (جدول ٨-٥) للعلاقة بين مقاومة الشد فى الأعمار المختلفة ومقاومة الشد بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

جدول (٨–٥) قيم إسترشادية لنسبة مقاومة الشد فى أعمار مختلفة.

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٥	٠,٧١	١	١,٠٥	١,٠٥
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٣/٢	٦/٥	١	١,٠٥	١,٠٥

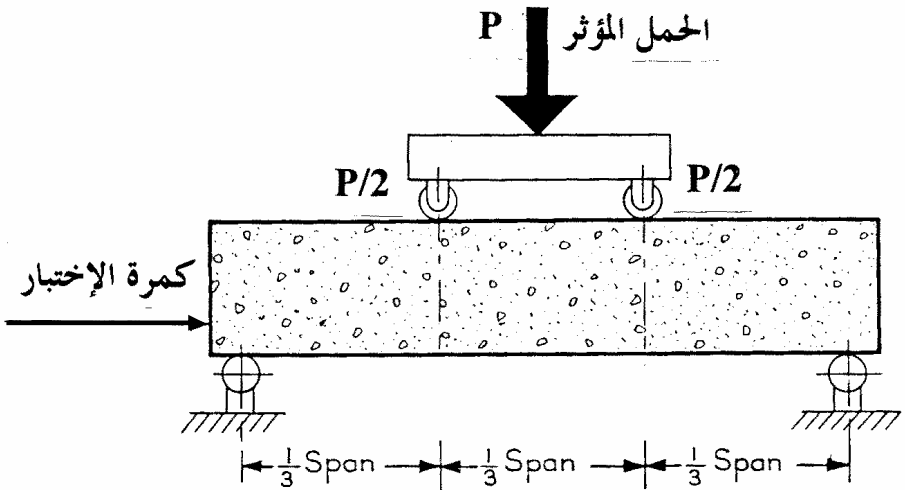
٨-٣ مقاومة الانحناء Bending Strength

عندما تتعرض كمرة خرسانية للإنحناء فإنه يمكن حساب مقاومة الإنحناء (التى تعتبر أيضاً مقياساً لمقاومة الشد غير المباشر) وتسمى معاير الكسر فى الإنحناء Modulus of Rupture وتتراوح قيم إجهادات معاير الكسر فى الإنحناء بين ١٢% - ٢٠% من مقاومة الضغط. وبالتالى فإن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد للخرسانة بنسبة من ٦٠ إلى ١٠٠%. وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية لـ ٦٠% من قيمة مقاومة الإنحناء. ومن ذلك يتضح أن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد البرازيلى بحوالى ٤٠%. ويجرى إختبارالإنحناء لتعيين مقاومة الخرسانة المتصلدة للإنحناء ودراسة سلوك الكمرات الخرسانية عند تعرضها لأحمال إنحناء وكذلك شكل الكسر الناتج عن إنهيار هذه الكمرات.

طريقة إجراء الإختبار :

توضع الخرسانة فى قوالب على شكل كمرات أبعادها الداخلية ١٥×١٥×٧٠سم أو ١٠×١٠×٥٠ سم وذلك للركام الذى لا يزيد مقاسه الإعتبارى الأكبر عن ٢٠ مم. تخلط الخرسانة وتملأ القوالب وتدمك وتعالج بنفس الطريقة المتبعة فى الضغط ويعمل من نفس الخلطة الخرسانية عينات ضغط لإعطاء فكرة عن العلاقة بين الضغط والإنحناء.

توضع الكمرة فى ماكينة الإختبار على ركيزتين كما هو مبين بشكل (٨-٢٦) ويراعى أن يكون كل من قضيب الإرتكاز والتحميل بطول أكبر من عرض الكمرة كما يكون التحميل تدريجيا وبمعدل منتظم يؤدى إلى الوصول بالقيمة النهائية للحمل فى مدة حوالى ٥ دقائق.



شكل (٨-٢٦) شكل الكمرة فى إختبار الانحناء.

ويفضل إجراء اختبار الانحناء للخرسانة بتحميل عينة الإختبار فى نقطتين Two-Point Loading لأن ذلك يجعل جزء الكمرة الذى يحدث بداخله الكسر معرض إلى عزم خالص Pure Bending دون تواجد قص فى ذلك الجزء الأمر الذى يجعل الكسر نتيجة مقاومة الإنحناء فقط وتعبر نتائج الإختبار عن مدى تأثر الخرسانة بالإنحناء. ويمكن فى بعض الأحيان -عند الضرورة- عمل إختبار الإنحناء بالتحميل فى نقطة واحدة وهى منتصف الكمرة المختبرة ولايعطى ذلك الإختبار إنحناء خالص بل إنحناء مصحوب بتأثير القص ويكون معاير الكسر له أقل من معاير الكسر فى حالة التحميل فى نقطتين.

يدون حمل الكسر P_{max} وتحسب مقاومة الإنحناء (معاير الكسر) من المعادلة:

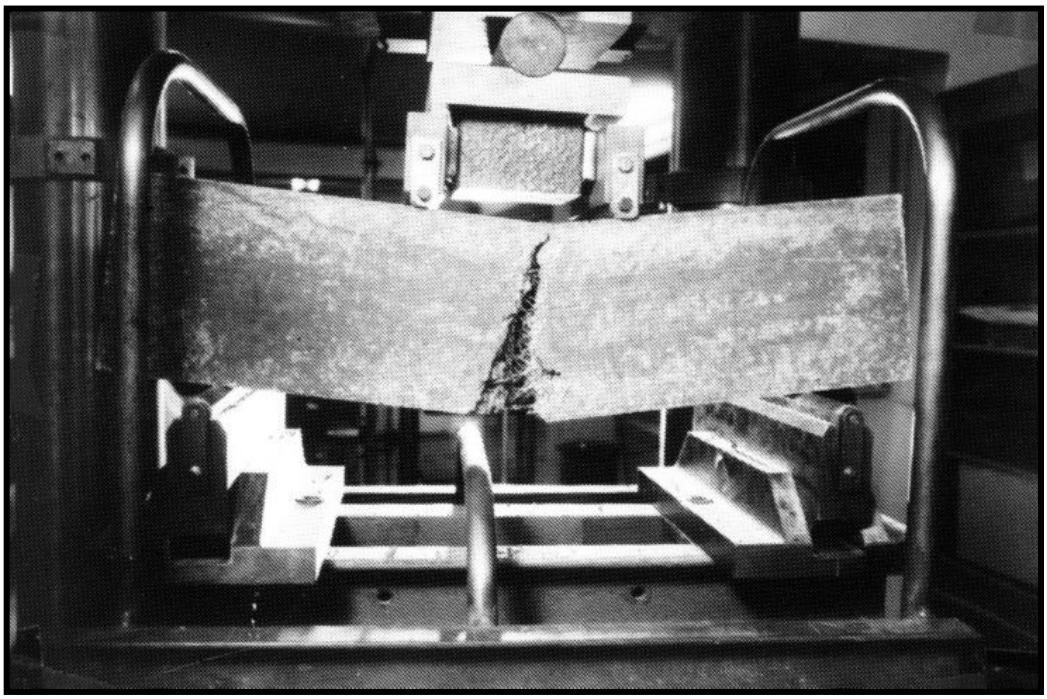
$$f_b = \frac{M_{max} \cdot Y}{I}$$

(حالة حملين مركزين) M_{max} = Maximum bending moment = P_{max} L / 6

Y = h/2 ,

I = Moment of inertia = $bh^3/12$

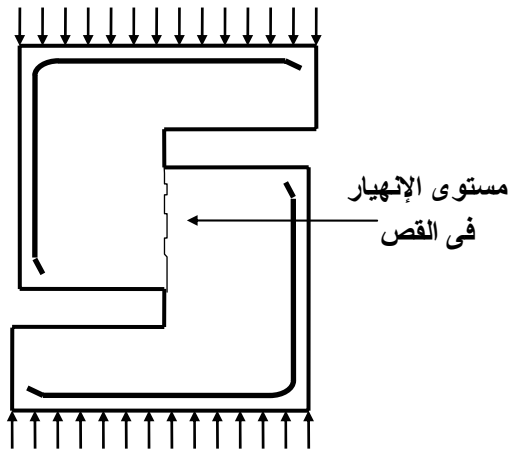
ويبين شكل (٨-٢٧) الكسر فى كمرة خرسانية معرضة لحملين مركزين.



شكل (٨-٢٧) شكل الكسر لكمرة فى إختبار الانحناء.

٨-٤ مقاومة القص Shear Strength

لا يمكن تعيين مقاومة القص فى حالة الخرسانة بقيمة صحيحة تماماً نظراً لأن قوى القص المباشرة (قوتين متساويتين ومتوازيتين تؤثران على مستويين على مسافة صغيرة جداً من بعضهما) تكون دائما مصحوبة بعزم إنحناء أى بإجهادات شد وضغط لذلك فمن النادر إجراء إختبار مقاومة القص المباشر للخرسانة وخصوصاً أنه فى إستعمالات الخرسانة نادراً ما تتعرض للقص الخالص وإنما تتعرض للقص المصحوب بإنحناء ويمكن إجراء إختبار تحديد مقاومة القص المباشر للخرسانة كما هو مبين بشكل (٨-٢٨) وهو إختبار غير دقيق النتائج. ويكون تعريض عينات الخرسانة لتأثير القص الخالص أحياناً بإجراء إختبار الإلتواء Torsion على عينة خرسانية غالباً ما تكون إسطوانية وذلك لأن الإلتواء يعطى إجهادات قص خالصة. ولكن هذا الإختبار من الصعب إجراؤه بدقة كما أن كسر العنصر الخرسانى يكون غالباً نتيجة تأثير الشد القطرى Diagonal Tension وليس بتأثير القص نظراً لأن الخرسانة ضعيفة فى الشد عنها فى القص. ولقد وجد أن مقاومة القص فى الخرسانة أكبر من مقاومتها للشد بحوالى ٢٠ إلى ٣٠% أى أنها حوالى ١٠ إلى ١٢% من مقاومة الضغط. أما إذا أجرى إختبار الإنحناء لبيان تأثير القص المصاحب لعزم الإنحناء وذلك بتقوية الكمرة المختبرة من جهة الشد بحديد تسليح لمنع الإنهيار بالشد الناتج من الإنحناء فإن القص المصاحب لعزم الإنحناء يظهر تأثيره بكسر العينة بواسطة إجهادات الشد القطرى الناتج من القص وليس بتأثير القص المباشر كما فى شكل (٨-٢٩). يتبين مما تقدم أن مقاومة الخرسانة للشد القطرى تعبر عن مدى مقاومة الخرسانة للقص لذلك لا يجرى إختبار القص للخرسانة إكتفاء بتعيين مقاومة الشد لها.



شكل (٨-٢٨) شكل عينة إختبار خرسانية فى القص.

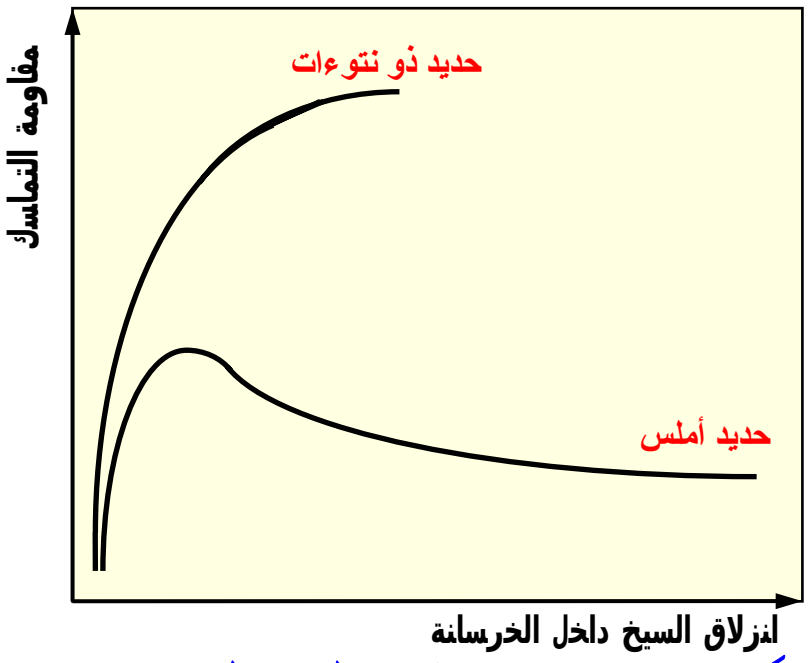
شكل (٨-٢٩) انهيار قص (شد قطرى) فى كمرة من الخرسانة المسلحة بدون كانات.

٨-٥ مقاومة التماسك Bond Strength

مقاومة التماسك هى مقاومة الخرسانة لإنزلاق سيخ التسليح الملتصق بها والموجود بداخلها ويعتبر تماسك أسياخ الحديد مع الخرسانة هو أساس فكرة التصميم الإنشائى للأعضاء الإنشائية من الخرسانة المسلحة ويتم هذا التماسك بواسطة:

- الإلتصاق مع الخرسانة Adhesion
- قوى الإحتكاك بين السيخ والخرسانة Friction
- التحميل على النتوءات البارزة فى الأسياخ Bearing

وتعتمد مقاومة التماسك على كلٍ من خواص الخرسانة وخواص الحديد وكذلك على مساحة التلامس بينهما. ومن البديهى أن تكون مقاومة التماسك أكبر فى حالة الأسياخ ذات النتوءات عنها فى حالة الأسياخ الملساء (شكل ٨-٣٠). وتتراوح مقاومة التماسك من ٢٥ إلى ٤٥ كج/سم^{٢} وذلك فى حالة الخرسانة ذات المقاومة العادية ($\cong$ ٢٥٠ كج/سم^{٢}) أما فى حالة الخرسانة عالية المقاومة فإن مقاومة التماسك قد تصل إلى ٨٠ كج/سم^{٢} أو أكثر. ويجرى إختبارتعيين مقاومة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح وذلك بتحديد الحمل المسبب لإنهيار وإنزلاق سيخ حديد التسليح داخل الخرسانة. وتوجد إختبارات عديدة لتعيين مقاومة التماسك تختلف عن بعضها فى كيفية تحميل سيخ حديد التسليح. وفيما يلى عرض سريع لبعض هذه الإختبارات.



شكل (٨-٣٠) مقاومة التماسك بين الحديد والخرسانة.

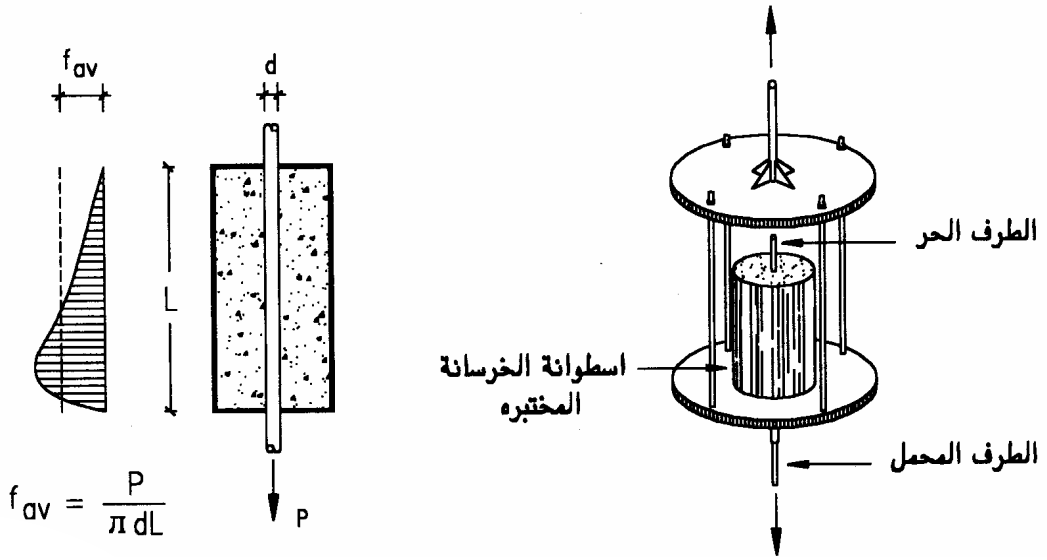
أ - اختبار الاقتلاع (الشد) Pull Out Test

- تُصب عينة الإختبار من الخرسانة على هيئة إسطوانة أو منشور على أن يكون فى محورها سيخ حديد تسليح بالقطر المعين المراد إختبار تماسكه.
- يُجرى معالجة العينة للمدة المناسبة المطلوبة وغالباً تكون ٢٨ يوما.
- تُوضع العينة بماكينة الإختبار بالطريقة التى تجعل السيخ معرضاً للشد من أحد طرفيه فقط وذلك لإقتلاعه من الخرسانة كما هو موضح بشكل (٨-٣١) وعلى ذلك يكون لسيخ الحديد طرف محمل وطرف آخر حر.
- يُركب جهاز قياس التشكل على سيخ التسليح من ناحية الطرف المحمل أو الطرف الحر أو من الناحيتين معاً وذلك لقياس الحركة النسبية بين الحديد والخرسانة.
- يُشد سيخ حديد التسليح من الطرف المحمل تدريجيا فيحدث إنزلاق Slip للطرف المحمل ويتبين ذلك بحركة نسبية بينه وبين الخرسانة يبينها جهاز قياس التشكل وتسجل قراءات الحمل والإنزلاق للطرف الآخر المحمل.
- تلاحظ قراءات جهاز قياس التشكل عند الطرف الحر حيث لا يبين الجهاز أى قراءة إلا عند تمام إنهيارتماسك السيخ مع الخرسانة وعندما يبدأ مؤشر الطرف الحر فى التحرك أى عندما يحدث أول إنزلاق للطرف الحر Initial Slip يسجل الحمل المسبب لذلك.
- تحدد من قراءات الحمل والإنزلاق للطرف المحمل قيمة الحمل المسبب لإنزلاق قيمته ٠,٢٥ مم.
- يعتبر التماسك بين الحديد والخرسانة فىحالة إنهيار فى إحدى الحالتين:

إما حدوث أول إنزلاق للطرف الحر أو حدوث إنزلاق قيمته ٠,٢٥ مم للطرف المحمل.

وعلى ذلك تحسب مقاومة التماسك أنها الحمل المسبب للإنزلاق مقسوماً على مساحة السيخ المتماسكة مع الخرسانة أى:

$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{P}{\pi\, d\, L} \quad \text{كج/سم}^2.$$



شكل (٨-٣١) قياس مقاومة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح.

ب- إختبار الدفع (الضغط) Push Out Test

يجرى الإختبار بنفس الطريقة السابقة لإختبار الإقتلاع لكن يكون تحميل حديد التسليح بالضغط بدلاً من الشد كما فى شكل (٨-٣٢). ولهذا الإختبار ميزة سهولة الإجراء إلا أنه يعطى مقاومة عالية للتماسك نظراً لأن كلا من الحديد والخرسانة فى حالة ضغط.

ج- إختبار السيخ المدفون Embedded Rod Test

يجرى الاختبار بتعريض السيخ المدفون فى عينة الإختبار والبارز من كل من نهايتها إلى حمل الشد من كل من طرفية ثم قياس الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة عند كل من نهايتي العينة بإستخدام جهاز قياس التشكل (شكل ٨-٣٣). ويعتبر الحمل المسبب لإنهيار التماسك هو الحمل الذى يحدث تغيير مفاجئ فى قيمة الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة. وتحسب مقاومة التماسك من المعادلة المذكورة سابقا وهذا الإختبار وإن كان يمثل الحالة الواقعية الفعلية لحديد التسليح داخل الخرسانة إلا أن من عيوبه صعوبة إمكان مقارنة نتائجة.

د- إختبار الإلتواء للسيخ Torsion Test

يجرى هذا الاختبار بتعريض سيخ حديد التسليح الموجود فى محور العينة المختبرة إلى عزم إلتواء (M_t) بعد تثبيت العينة فى مكنة الإختبار وزيادة التحميل (شكل ٨-٣٤). وتسجل قيمة زاوية الإلتواء المصاحبة لكل عزم إلتواء لحديد التسليح بالنسبة للخرسانة الموجودة عند الطرف المحمل والطرف الحر لحديد التسليح ثم يعين عزم الإلتواء الذى يحدث عنده الإنزلاق ثم تحسب مقاومة التماسك من المعادلة:

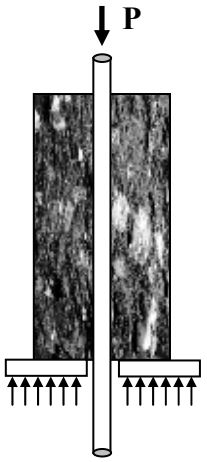
$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{2\,M_t}{\pi\,d^2\,L}$$

حيث d = قطر السيخ

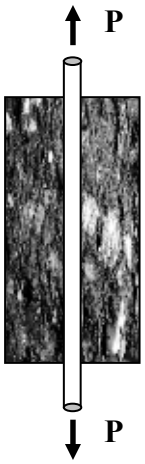
M_t = عزم الألتواء عند الإنزلاق

L = الطول المدفون من السيخ فى الخرسانة.

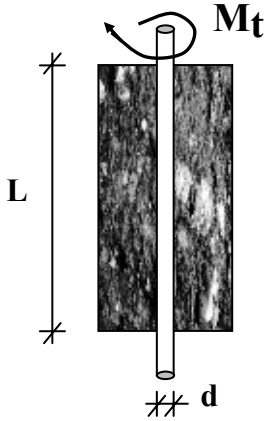
وهذا الاختبار محدود جداً ونادر إجرائه.



شكل (٨-٣٢) الدفع



شكل (٨-٣٣) السيخ المدفون



شكل (٨-٣٤) الإلتواء.

هـ- اختبار الكمرة Beam Test

يجرى هذا الاختبار بتحميل كمرة خرسانية بها أسياخ تسليح فى ناحية الشد بحمل فى منتصفها أو بحمل فىنقطتين وزيادة التحميل تدريجيا كما فى شكل (٨-٣٥) فيحدث ذلك إنهيار التماسك فى المنتصف عند حمل معين ويزحف ذلك الإنهيار على طول السيخ على جانبية حتى طرفيه بإزدياد التحميل وتقاس الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة عند أى مقطع من مقاطع الكمرة ثم تحسب مقاومة التماسك عند أى مقطع على أساس الحمل المسبب لحدوث أول إنزلاق Slipبين الخرسانة وحديد التسليح عند هذا المقطع وذلك من المعادلة :

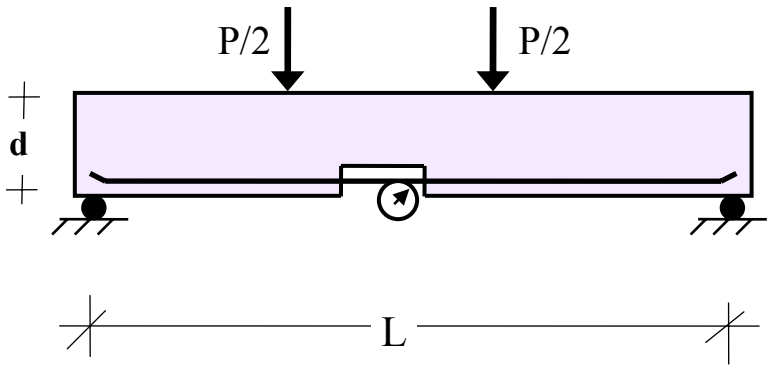
$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{V}{Y_{ct} \sum \phi}$$

حيث V = قوة القص عند المقطع المستعرض

Y_{ct} = العمق الفعال للكمرة = $0.87\ d$

$\sum \phi$ = مجموع محيط أسياخ حديد التسليح

وهذا الإختبار يمثل تماماً حالة التماسك بين حديد التسليح والخرسانة ويمكن إستخدام نتائجه مباشرة فىالتصميم إلا أنه أكثر تكلفة علاوة على صعوبة إجرائه. ويراعى تعرية الجزء الأوسط من أسفل للكمرة حتى يمكن قياس الإنزلاق بين الحديد والخرسانة.



شكل (٨-٣٥) إختبار الكمرة لتعيين مقاومة التماسك بين الحديد والخرسانة.

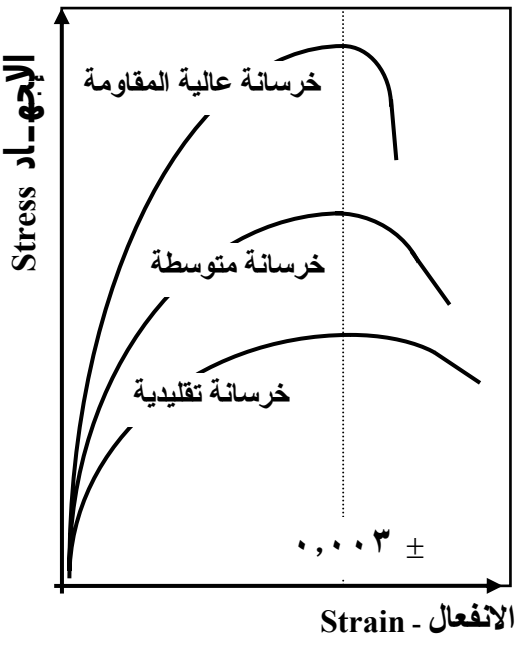
٨-٦ معايير المرونة Modulus of Elasticity

٨-٦-١ تعريف

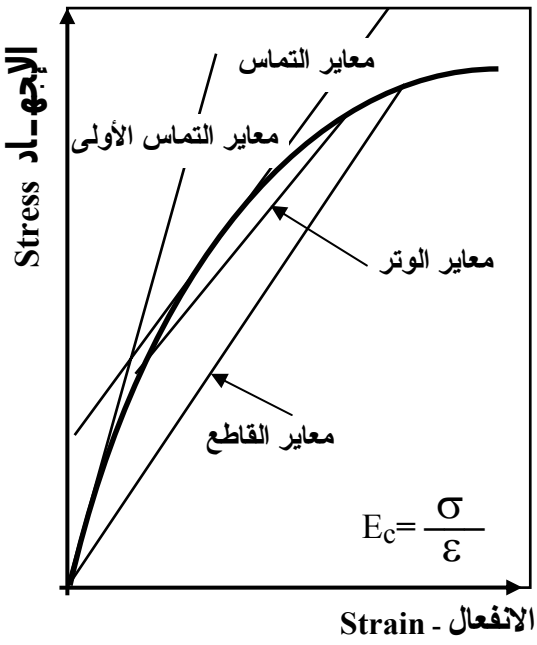
معايير المرونة هو التغير فى الإجهاد بالنسبة إلى التغير فى الإنفعال المرن. وهو يُعبر عن صلابة المادة أى مقاومتها للتشكل.

و معايير المرونة دالة فى مقاومة الخرسانة للضغط $E_c = \varphi\ (f_c)$ ونظراً لأن الخرسانة المتصلدة مادة ليست مرنه تماماً Elasto-plastic فإن العلاقة بين الإجهاد والإنفعال تكون غالباً منحنى ويقل هذا الإنحناء كلما أرتفعت رتبة الخرسانة أنظر شكل (٨-٣٦). ويمكن التعبير عن معايير المرونة بأحد الصور الأربعة الآتية والتى يوضحها شكل (٨-٣٧).

١- معايير التماس الأولى Initial Tangent Modulus
٢- معايير التمـــاس Tangent Modulus
٣- معايير القـاطـع Secant Modulus
٤- معايير الـوتـــر Chord Modulus



شكل (٨-٣٦) العلاقة بين الإجهاد والانفعال.



شكل (٨-٣٧) الصور المختلفة لمعاير المرونة.

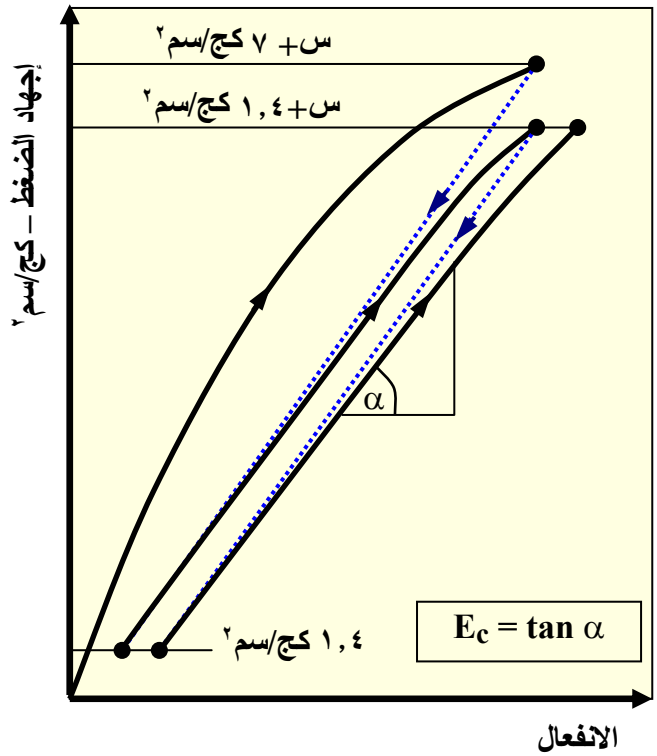
٨-٦-٢ اختبار معاير المرونة فى الضغط Modulus of Elasticity Test

يهدف هذا الإختبار لتعيين معاير المرونة للخرسانة لفائدة ذلك فى معرفة صلابة Stiffness الخرسانة وكذلك لمعرفة قيمة معاير المرونة فى حساب تشكل المنشآت الخرسانية Deformation كما يفيد فى تعيين نسبة معاير مرونة الحديد إلى الخرسانة لأهميتها فى التصميم $n = E_s / E_c$. وفيما يلي شرح لكيفية تعيين معاير المرونة للخرسانة وذلك طبقاً لما جاء بالمواصفات الإنجليزية B.S.S. 1881

❐ طريقة التحميل الإستاتيكى

- تُعمل خلطة خرسانية وفقاً للبيانات المطلوبة وتصب وتدمك هذه الخلطة فى قوالب إما على شكل إسطوانات بقطر ١٥ سم وإرتفاع ٣٠ سم أو منشورات بحيث تكون النسبة بين الإرتفاع إلى العرض لا تقل عن ٢ وتصب من نفس الخلطة عينات للضغط بعد ٢٨ يوما.

- بعد المعالجة لمدة ٢٨ يوماً أو المدة المحددة يُثبت مقياسين للإنفعال على سطح العينة وفى مقابل بعضها وموازيين لمحور عينة الإختبار كما بشكل (٨-٣٨). تحمل العينة بمكنة الإختبار بمعدل ١٤٠ كج/سم٢/دقيقة حتى يصل الإجهاد إلى (س + ٧) كج/سم٢ حيث س = ثلث متوسط مقاومة الضغط.



شكل (٨–٣٨) قياس معاير المرونة للخرسانة.

- **يستمر التحميل بهذا الإجهاد لمدة دقيقة على الأقل ثم يقلل تدريجيا إلى ١,٤ كج/سم٢ ثم تؤخذ قراءات مقياس الإنفعال ثم يعاد التحميل ثانياً وبنفس المعدل إلى أن يصل الإجهاد إلى (١,٤+س) كج/سم٢ ويستمر التحميل عند هذه القيمة لحين أخذ قراءات الإنفعال ثم يقلل التحميل ثانياً وتدريجيا وتؤخذ القراءات ثانياً عند ١,٤ كج/سم٢.**

- **يعاد التحميل مرة ثالثة وتؤخذ ١٠ قراءات لمقياس الإنفعال عند ١٠ زيادات للإجهاد تكون متساوية تقريباً إلى أن يصل الإجهاد إلى (١,٤ + س) كج/سم٢. يتم مقارنة قيم الإنفعال الكلى الحادث فى حالتى التحميل الثانية والثالثة فإذا كان هناك إختلاف أكثر من ٥% يتم عمل دورة تحميل رابعة وهكذا حتى يصل الفرق بين دورتى تحميل متتاليتين إلى ٥% أو أقل وبذلك يمكن تحديد العلاقة بين الإجهاد والإنفعال الناتج عنه من حالة التحميل الأخيرة ويتم قياس معاير المرونة كما فى الشكل.**

- **تدون النتائج فى جدول يوضح الزيادة فىالحمل ومقدار التشكل المناظر ثم تحسب قيم الإجهادات والإنفعالات المناظرة ومنها يمكن رسم بيانى يوضح العلاقة بين الإجهاد والإنفعال للخرسانة ثم يعين معاير المرونة للخرسانة والذى يساوى ميل هذا الخط البيانى.**

الحمل	قراءة أجهزة قياس الإنفعال			الإجهاد	الإنفعال
كج	الجهاز الأيمن	الجهاز الأيسر	المتوسط	كج/سم٢	مم/مم

❑ تعيين معاير المرونة بالطريقة الديناميكية

يمكن تحديد معاير المرونة ديناميكياً وذلك بتعريض عينة الخرسانة إلى إهتزازات ترددية وتحديد عدد الدورات فى الثانية الذى يحدث عندما تكون إهتزازات الخرسانة فى حالة رنين ثم حساب معاير المرونة من معادلة معينة ترفق مع جهاز الإختبار.

٨-٦-٣ تعيين معاير المرونة فى الإنحناء

وقد يقاس معاير المرونة للخرسانة من إختبار الإنحناء الكمرى (شكل ٨-٣٩) وذلك بتعريض كمرة خرسانية لحمل مركز فى منتصفها وقياس الترخيم الحادث ثم حساب قيمة معاير المرونة كما يلى:

$$E_C = \frac{PL^3}{48\Delta I}$$

حيث:

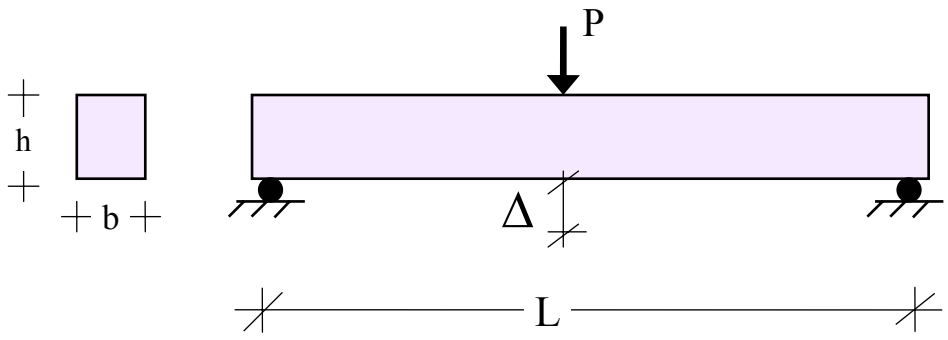
- P هو الحمل فى منتصف الكمرة
- L هو بحر الكمرة
- I هو عزم القصور الذاتى للمقطع المستعرض
- Δ هو الترخيم عند متصف الكمرة Deflection

ونظراً لأن النسبة بين الإرتفاع و البحر للكمرة المستخدمة فى هذا الإختبار $(\frac{h}{L})$ تكون كبيرة
نسبياً فيفضل أخذ قيمة الترخيم الناتجة عن تأثير قوى القص فى الإعتبار. وعليه يمكن حساب معاير المرونة من المعادلة الآتية:

$$E_c = \frac{PL^3}{48\Delta I}\left[1+(2.4+1.5\,\nu)\left(\frac{h}{L}\right)^2-0.84\left(\frac{h}{L}\right)^3\right]$$

حيث:

- h هو إرتفاع (عمق) الكمرة
- ν نسبة بواسون (الإنفعال العرضى / الإنفعال الطولى) وهى تتراوح من ٠,١٥ إلى ٠,٢ للخرسانة.



شكل (٨-٣٩) قياس معاير المرونة من إختبار الإنحناء.

٨-٦-٤ العوامل التى تؤثر على قيمة معاير المرونة

تؤثر العوامل المختلفة المؤثرة على مقاومة الضغط غالباً على معاير المرونة بنفس الطريقة تقريباً إلا أنه بمعدل أقل. وأهم هذه العوامل هى كمية الأسمنت - نسبة م/س - العمر - نوع وتدرج الركام - حالة المعالجة - درجة الرطوبة عند الإختبار - معدل التحميل. وهناك عاملان هامان يؤثران على قيمة معاير المرونة وهما:

- معاير مرونة الركام المستخدم.
- كثافة الخرسانة .

٨-٦-٥ بعض العلاقات لتعيين معاير المرونة

$$E_c = 14000 \sqrt{f_{cu}} \quad \text{.....} \quad (١)$$

$$E_C = 0.136\,\gamma^{1.5} \sqrt{f_{CU}} \quad \text{.....} \quad (٢)$$

حيث γ هى كثافة الخرسانة طن/م^٣ و E_c , f_{cu} تقاس بـ كج/سم^٢.

المعادلة رقم (١) هى معادلة الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة وهى قابلة للتطبيق للخرسانة المعتادة الإستخدام فى مصر والتى لاتزيد مقاومة الضغط لها عن ٤٥٠ كج/سم^٢. أما المعادلة رقم (٢) فهى معادلة معهد أبحاث الخرسانة الإمريكى ACI وتأخذ كثافة الخرسانة فى الإعتبار وهى قابلة للتطبيق للخرسانة ذات الكثافة من ١٥٠٠ إلى ٢٥٠٠ كج/م^٣ ويعرف معاير المرونة فيها بأنه ميل الخط الواصل من إجهاد قيمته صفر إلى إجهاد قيمته $0.45\,f_c$ (معاير القاطع).

٨-٦-٦ النسبة المعيارية Modular Ratio (n)

وهى النسبة بين معاير المرونة للصلب (Es) ومعاير المرونة للخرسانة (Ec) وهى مفيدة فى تصميم الخرسانة المسلحة بنظريات المرونة.

أى أن $$n = \frac{E_S}{E_C}$$

و معاير المرونة لصلب التسليح غالباً يتراوح بين ٢٠٠٠ إلى ٢١٠٠ طن/سم٢ أما بالنسبة للخرسانة فنظراً لأنها تتعرض لإجهادات متغيرة أو دائمة وأيضا إلى إجهادات نتيجة الزحف فإن قيمة معاير المرونة غالباً تؤخذ أقل من القيمة المقاسة معملياً. فإذا فرضنا أن معاير مرونة للخرسانة = ١٤٠ طن/سم٢ وللصلب = ٢١٠٠ طن/سم٢ فإن النسبة المعيارية (n) = ٢١٠٠ ÷ ١٤٠ = ١٥ أما فى حالة الخرسانة عالية المقاومة فقد يؤخذ معاير المرونة من ٢٠٠ إلى ٣٥٠ طن/سم٢ أى أن قيمة n قد تصل إلى ١٠ أو أقل.

٨-٦-٧ نسبة بواسون Poisson's Ratio (ν)

هى النسبة بين الإنفعال العرضى الى الإنفعال الطولى عندما يؤثر على الخرسانة إجهاد ضغط فى حدود المرونة. وقيمة نسبة بواسون للخرسانة حوالى ٠,٢٠ فى حالة الحمل المؤثر ببطء أما إذا كان الحمل متزايد فتصل نسبة بواسون إلى حوالى ٠,٢٢ كذلك فإن نسبة بواسون تكون أقل نسبياً فى الخرسانة عالية المقاومة ، ونسبة بواسون لها أهميتها فى التحليل الإنشائى للبلاطات المسطحة والأنفاق ولكنها لا تؤخذ فى الإعتبار فى التصميمات العادية للخرسانة.

$$\nu = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v}$$

حيث:

ν هى نسبة بواسون

ε_h الإنفعال العرضى

ε_V الإنفعال الطولى

****